



Bachelorarbeit

Herr

Sven Neumann

Strukturieren von Bipolar- platten mittels Laser in der Brennstoffzellenfertigung

Mittweida, 2013

Bachelorarbeit

Strukturieren von Bipolar- platten mittels Laser in der Brennstoffzellenfertigung

Autor:

Herr

Sven Neumann

Studiengang:

Physikalische Technik

Seminargruppe:

PT08wL-B

Erstprüfer:

Prof. Dr. rer. nat. Bernhard Steiger

Zweitprüfer:

Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Hommel

Einreichung:

Mittweida, 06.12.2013

Verteidigung/Bewertung:

Mittweida, 2014

Bachelor's Thesis

Structuring of bipolar plates in fuel cell production by laser

author:

Mr.

Sven Neumann

course of studies:

Physical Engineering (Bachelor)

seminar group:

PT08wL-B

first examiner:

Prof. Dr. rer. nat. Bernhard Steiger

second examiner:

Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Hommel

submission:

Mittweida, 06.12.2013

defence/ evaluation:

Mittweida, 2014

Bibliografische Beschreibung:

Neumann, Sven:

Strukturieren von Bipolarplatten mittels Laser in der Brennstoffzellenfertigung. - 2013. - VII, 61, A-IV S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Mathematik, Naturwissenschaften, Informatik, Bachelorarbeit, 2013

Referat:

Der Gegenstand der Arbeit ist, Mikrogeometrien mittels Laser auf Bipolarplatten aus hochgefüllten Graphit-Polypropylen herzustellen. Dadurch wird die Oberfläche der Bipolarplatten vergrößert, um die Kontaktwiderstände, sowohl zwischen den Platten sowie einer Gasdiffusionslage, zu senken. Desweiteren wird ein Flächenabtrag auf den eingesetzten Bipolarplatten realisiert, um einen Fräsvorgang zu ersetzen. Somit werden die Laserparameter für die Erzeugung dieser Strukturen, und ihre Funktionalität untersucht.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die zu dieser Arbeit beigetragen haben. Besonderer Dank gilt hierbei der Firma SITEC, die mir die Möglichkeit gab, diese Arbeit in ihrem Hause zu bearbeiten. Vor allem geht mein Dank dabei an meine betrieblichen Betreuer Herrn Prof. Bernd Hommel und Herrn M. sc. Christian Endisch sowie meinem Hochschulbetreuer Prof. Bernhard Steiger.

Ich möchte mich natürlich auch bei meinen Eltern, für die Unterstützung während des gesamten Studiums, bedanken.

Inhalt

Inhalt	I
Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis.....	VI
1 Einleitung	1
2 Aufgabenstellung	2
3 Theoretische Grundlagen und Stand der Technik.....	4
3.1 Brennstoffzellentechnik.....	4
3.1.1 Geschichte der Brennstoffzelle.....	4
3.1.2 Funktionsweise der Brennstoffzelle	5
3.1.3 Brennstoffzellenarten.....	7
3.1.4 Effizienz	8
3.1.5 Die Bipolarplatte	10
3.1.5.1 Bipolarplattenmaterial	11
3.2 Laserabtragen.....	13
3.2.1 Laserstrukturieren.....	15
3.2.2 Maskenverfahren	16
3.2.3 Scannerverfahren	16
4 Versuchsvorbereitung.....	18
4.1 Strukturierungsziel.....	18
4.2 Versuchsplanung.....	19
4.3 Widerstandsmessung	22
5 Versuchsdurchführung	24
5.1 ACI- Beschriftungslaser	24
5.1.1 Versuchsaufbau.....	24
5.1.2 Durchführung	25
5.1.3 Ergebnisse und Zusammenfassung	28
5.2 Explorer XP.....	29
5.2.1 Versuchsaufbau.....	29
5.2.2 Durchführung	30
5.2.3 Ergebnisse und Zusammenfassung	35
5.3 Faserlaser IPG – YLR.....	36

Inhalt	II
5.3.1 Versuchsaufbau.....	36
5.3.2 Durchführung.....	37
5.3.3 Ergebnisse und Zusammenfassung	50
6 Auswertung	51
7 Zusammenfassung und Ausblick	57
8 Literatur	59
9 Anlagen.....	62
10 Selbstständigkeitserklärung	

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: zu strukturierende Bereiche der Bipolarplatte [HEI13]	2
Abbildung 2: Schema von Groves Brennstoffzelle [DIE13]	4
Abbildung 3: Aufbau und Funktionsprinzip einer PEM-Brennstoffzelle [ZIM11]	6
Abbildung 4: theoretische Wirkungsgrade im Vergleich [WAS13]	9
Abbildung 5: 3D-Model der Vor- und Rückseite einer Bipolar-Halbplatte [KRE08]	10
Abbildung 6: Bipolar-Halbplatte mit Dichtungseinheit und MEA [HEI09]	11
Abbildung 7: Hexagonale Schichtgitter-Kristallstruktur von Graphit [BAY13]	11
Abbildung 8: Mechanismen und Verfahrensvarianten des Laserabtrags [KOR07]	16
Abbildung 9: Schema Maskenverfahren [TRU06]	16
Abbildung 10: Schema Scannerverfahren [TRU06]	17
Abbildung 11: Bipolarplatte mit Erhebungen der Auswerferstifte	18
Abbildung 12: Treppenstruktur mit unterschiedlicher Schrittweite	20
Abbildung 13: Darstellung der Strukturaufteilung	20
Abbildung 14: Prinzipskizze zur Erzeugung der Gitterstruktur	21
Abbildung 15: Darstellung der Vierpol- Widerstandsmessaparatur	23
Abbildung 16: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus [REI13]	25
Abbildung 17: Ablationsschwelle für Graphit-Polypropylen	26
Abbildung 18: Ablatierte Zone von Graphit-Polypropylen bei $F_0 = 3,38 \text{ J/cm}^2$	27
Abbildung 19: Flächenabtrag	28
Abbildung 20: Versuchsaufbau des Lasersystems in der CNC-Maschine	30
Abbildung 21: Screenshot der Beschriftungssoftware laserDESK	32
Abbildung 22: Abtrag einer Erhebung der Auswerferstifte	33
Abbildung 23: V- Nut mit Winkel ca. 65°	34
Abbildung 24: mehrere Bahnen mit Winkel 65°	34
Abbildung 25: Versuchsaufbau des Lasersystems auf dem optischen Tisch	37

Abbildungsverzeichnis	IV
Abbildung 26: Nut bei 180 µm Schrittabstand.....	39
Abbildung 27: V-Nut mit einem Winkel von ca. 60°.....	39
Abbildung 28: V-Nut mit einem Winkel von ca. 65°.....	40
Abbildung 29: V-Nut mit einem Winkel von ca. 70°.....	41
Abbildung 30: mehrere Bahnen mit Winkel 65°	41
Abbildung 31: Abtragstiefe in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit.....	42
Abbildung 32: Gitterstruktur mit voreingestellten Delays	44
Abbildung 33: einzelne Zwischenlinien	44
Abbildung 34: Längslinien mittig	45
Abbildung 35: Gitterstruktur mit links: 240 µm; rechts: 300 µm Gitterabstand	46
Abbildung 36: Gitterstruktur mit 30, 80, 130, 180 µm Tiefe	46
Abbildung 37: Punkstruktur	48
Abbildung 38: Vergleich bisherige Markierung (oben) und neue Markierung (unten).....	49
Abbildung 39: Vergleich bisherige Markierung (links) und neue Markierung (rechts).....	49
Abbildung 40: normierter Innenwiderstand über Abtragstiefe	51
Abbildung 41: Kontaktwiderstand in Abhängigkeit der Gittertiefe	53
Abbildung 42: Bulkwiderstand in Abhängigkeit des Strukturwinkels	53
Abbildung 43: Kontaktwiderstand in Abhängigkeit der Gittertiefe	54
Abbildung 44: Bulkwiderstand in Abhängigkeit des Strukturwinkels	55

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Brennstoffzellenarten [GEI04]	8
Tabelle 2: Kenndaten von reinem Graphit (Monokristall) [ÖZT12].....	12
Tabelle 3: Verfahrensvarianten des Laserabtrags [KLO07]	13
Tabelle 4: Technische Daten DPL Fortis Marker	24
Tabelle 5: Technische Daten Explorer XP	29
Tabelle 6: Parameter für den Flächenabtrag	31
Tabelle 7: Parameter für die Erzeugung der V-Nut.....	35
Tabelle 8: Technische Daten des Faserlasers.....	36
Tabelle 9: Parameter für den Flächenabtrag	38
Tabelle 10: Parameter für die Herstellung der V- Nuten.....	42
Tabelle 11: Werte für die Vorschubgeschwindigkeit	43
Tabelle 12: Parameter zur Bearbeitung der Gitterstruktur	47
Tabelle 13: Parameter für die Punktstruktur	48
Tabelle 14: Parameter zur Herstellung des Data Matrix Codes.....	50
Tabelle 15: Aufteilung der Strukturen für die erste Messung	52
Tabelle 16: Aufteilung der Strukturen für die zweite Messung.....	54
Tabelle 17: Bearbeitungszeiten.....	56

Abkürzungsverzeichnis

cw	.....	continuous wave
d_f	.....	Spotdurchmesser
d_s	.....	Durchmesser der ablatierten Zone
E	.....	Standard-Elektrodenpotential
E_{Puls}	.....	Pulsenergie
f_p	.....	Repetitionsrate
F₀	.....	Spitzenfluenz
F_s	.....	Schwellfluenz
GDL	.....	Gasdiffusionslage
MEA	.....	Membrane Electrode Assembly
Nd:YAG	.....	Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat
Nd:YVO₄	.....	Neodym-dotierter Yttrium-Vanadat
P_{av}	.....	mittlere Leistung
PEM	.....	Proton Exchange Membran
P_L	.....	Laserleistung
r	.....	Radius der ablatierten Zone
r_s	.....	Radius der ablatierten Zone bei Schwellfluenz
R_D	.....	Durchgangswiderstand
R_{ges}	.....	Gesamtwiderstand
R_K	.....	Kontaktwiderstand
R_z	.....	gemittelte Rauhtiefe
R_Ω	.....	Bulkwiderstand
T_O	.....	obere Systemtemperatur
T_U	.....	Umgebungstemperatur
Ü	.....	Pulsüberlapp

v	Vorschubgeschwindigkeit
ZBT	Zentrum für Brennstoffzellen Technik
ΔG	freie Reaktionsenthalpie
ΔH	Reaktionsenthalpie
η_{Br}	Brennstoffzellenwirkungsgrad
η_C	Carnot-Wirkungsgrad
λ_G	Wärmeleitfähigkeit
σ_G	Stromleitfähigkeit
τ_p	Pulslänge
ω_0	Gaußscher Radius

1 Einleitung

Aufgrund der immer knapper werdenden fossilen Brennstoffe und der Diskussion um eine CO₂-arme Energiequelle, um die Auswirkungen des weltweiten Klimawandels zu reduzieren, stellt die Brennstoffzellentechnologie eine interessante Alternative zu konventionellen Energiequellen dar. Brennstoffzellen sind Energiewandler, die chemische Energie direkt in elektrische Energie umwandeln, ohne dass, zumindest bei der Verwendung von Wasserstoff, Schadstoffemissionen anfallen. Konventionelle Stromerzeuger wandeln die Energie des Brennstoffes zunächst durch Verbrennung in thermische Energie um, diese anschließend in Bewegungsenergie und diese dann über einen Generator in die gewünschte elektrische Energie. Die Brennstoffzellentechnologie hat somit das Potential, die bisherigen Versorgungssysteme für elektrische Energie weitgehend zu verändern. Die Brennstoffzellen arbeiten nach dem umgekehrten Prinzip der Elektrolyse, bringen also Wasserstoff oder andere Brennstoffe und Sauerstoff wieder zusammen. Dabei entsteht als Produkt reines Wasser. Brennstoffzellen erreichen dabei sehr hohe theoretische Wirkungsgrade von ca. 80%. Die einzelnen Zellen lassen sich je nach Bedarf zu einem Stack (engl. Stapel) in Reihe zusammenschalten, um die benötigte Leistung zu erreichen.

Die Zellen sind prinzipiell alle gleich aufgebaut und bestehen aus einem Elektrolyt, welches sich zwischen zwei Elektroden befindet. Die Ausgangsstoffe werden über Bipolarplatten, aus Graphit-Polypropylen oder Metall, in die Brennstoffzelle geleitet. Diese Bipolarplatten verbinden die einzelnen aktiven Zellen eines Brennstoffzellen-Stacks und sollten eine gute elektrische und thermische Leitfähigkeit aufweisen. Zusätzlich leiten sie die Reaktionswärme nach außen, leiten die Anpresskräfte in den Stack und trennen die Ausgangsstoffe gasdicht voneinander sowie nach außen.

Um die Leistungsfähigkeit von Brennstoffzellen zu erhöhen, kann die Oberfläche der eingesetzten Bipolarplatten mit einer Mikrostruktur versehen werden, um die Oberfläche zu vergrößern und somit den Kontaktwiderstand zu verringern. In Vorversuchen wurde bereits ermittelt, dass solch eine Mikrogestalt einen positiven Einfluss auf den Kontaktwiderstand aufweisen kann. In der vorliegenden Arbeit soll daher untersucht werden wie diese Strukturen mittels Laser in die Oberfläche eingebracht werden können um sowohl den Kontaktwiderstand zwischen den einzelnen Platten als auch den zwischen der Bipolarplatte und einer Gasdiffusionslage (kurz GDL) zu verringern.

2 Aufgabenstellung

Für die wettbewerbsfähige Weiterentwicklung der Brennstoffzellentechnologie ist es notwendig, die erforderlichen Komponenten verfahrenstechnisch zu optimieren, um den Wirkungsgrad der Brennstoffzelle weiter zu verbessern. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Reduzierung der Widerstandswerte der eingesetzten Bipolarplatten aus Graphit-Polypropylen. Die Bipolarplatten werden durch Spritzgießen hergestellt. Bei der Abkühlung im Spritzgusswerkzeug entsteht jedoch eine schlecht leitende Schicht an der Oberfläche. Um den Innenwiderstand zu verringern, ist es daher notwendig die schlecht leitende Schicht zu entfernen. Zu diesem Zweck soll mittels Laser ein flächiger Abtrag der Kontaktflächen realisiert werden. Zurzeit wird diese Schicht durch einen Fräsvorgang entfernt, was allerdings einen zusätzlichen Arbeitsschritt bedeutet. Nach der Entfernung dieser Schicht mit dem Laser wird sowohl auf der Vorder- als auch auf der Rückseite eine Mikrostruktur erzeugt die die Kontaktfläche vergrößert, und somit den Übergangswiderstand verringert. Dabei wird auf der Vorderseite im gesamten Flow-Field-Bereich (schwarzer Bereich Abbildung 1) eine Gitterstruktur und auf der Rückseite (Kühlkanal-Seite) im gesamten Kontaktbereich eine Linienstruktur mit V-förmigen Querschnitt realisiert. In Abbildung 1 sind die verschiedenen Bereiche der Bipolarplatte, welche strukturiert werden sollen, dargestellt.

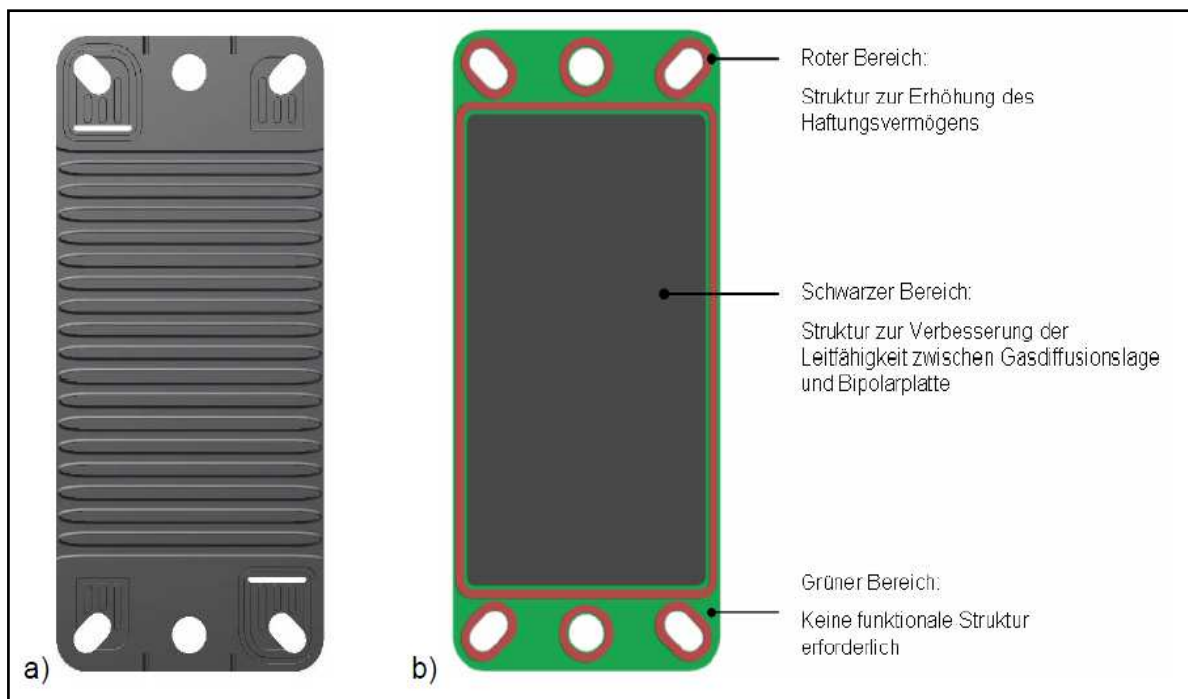


Abbildung 1: zu strukturierende Bereiche der Bipolarplatte [HE113]

a) Platten-Rückseite b) Platten-Vorderseite

Neben den Strukturen zur Verbesserung des Übergangswiderstandes ist vorgesehen eine dritte Struktur zur Steigerung der Haftungseigenschaften der Oberfläche der Bipolarplatte herzustellen (roter Bereich). Die Abdichtung der Ausgangsstoffe zur Umgebung und zueinander wird durch eine Silikondichtung gewährleistet. Um den Haftkontakt von Silikon zum Graphit-Polypropylen zu erhöhen, wird bisher ein Haftvermittler auf die Bipolarplatte aufgebracht. Dies ist wichtig, um ein Verrutschen bzw. Abfallen der Dichtung bei der Montage der Brennstoffzellen-Stacks zu verhindern. Dieser zusätzliche Arbeitsschritt benötigt Zeit, da der Haftvermittler nach dem Aufbringen auf die Bipolarplatte in einem Ofen 15 Minuten aushärten muss. Dieser zusätzliche Arbeitsschritt kann, durch die Aufbringung einer weiteren Struktur wegfallen. Diese Struktur soll die mechanische Adhäsion zwischen der Bipolarplatte und dem Dichtungsmaterial erhöhen, so dass die Dichtung auch ohne Haftvermittler nicht verrutscht. In Vorversuchen hat sich eine Punktstruktur als geeignet für diese Aufgabe erwiesen.

Um die hergestellten Bipolarplatten zurückverfolgen zu können, werden diese durch einen Laser markiert. Die Erzeugung der genannten Strukturen und der Markierung ist somit mit demselben Lasersystem vorgesehen.

3 Theoretische Grundlagen und Stand der Technik

3.1 Brennstoffzellentechnik

3.1.1 Geschichte der Brennstoffzelle

1838 wurde vom Schweizer Forscher Christian Friedrich Schönbein erstmals das Funktionsprinzip einer Brennstoffzelle bei Elektrolyseversuchen entdeckt und 1839 veröffentlicht. Dieser hatte zwei Platindrähte in Salzsäure mit Wasserstoff bzw. Sauerstoff umspült und zwischen den Drähten eine elektrische Spannung festgestellt. Als offizieller Erfinder gilt jedoch der britische Jurist Sir William Robert Grove (1811-1896), der 1839 eine „galvanische Gasbatterie“ vorstellte, welche durch die sogenannte kalte Verbrennung von Wasserstoff und Sauerstoff Strom erzeugen konnte. Diese „galvanische Gasbatterie“ bestand aus zwei Platinelektroden, die in Schwefelsäure getaucht und mit Wasserstoff und Sauerstoff umspült wurden. Da die messbare Spannung und der Stromfluss jedoch sehr gering waren, schaltete Grove mehrere dieser Brennstoffzellen zusammen, um eine höhere Spannung zu erhalten, wie Abbildung 2 dargestellt.

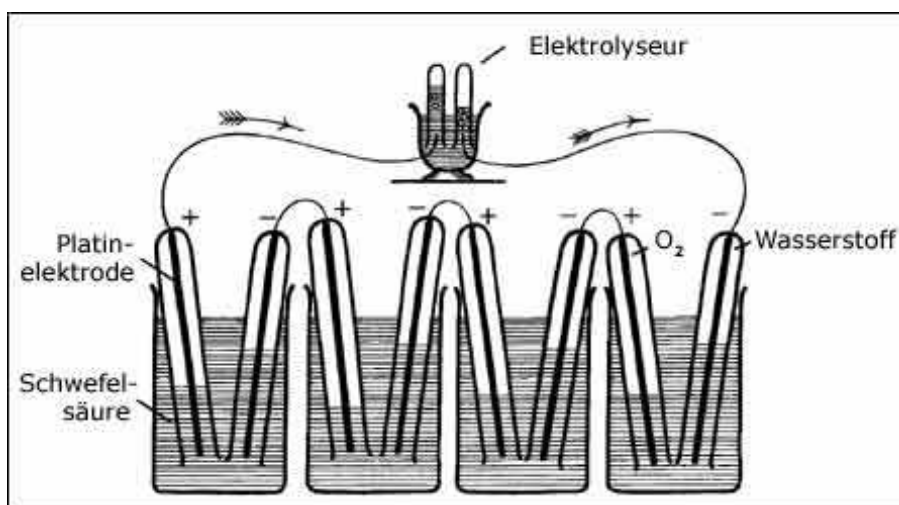


Abbildung 2: Schema von Groves Brennstoffzelle [DIE13]

Durch die Entdeckung des dynamoelektrischen Prinzips (1866) durch Werner von Siemens (1816-1892), die Weiterentwicklung der Dampfmaschine, dem Aufkommen von Otto- (1863) und Dieselmotoren (1892) sowie Dampf- (1883) und Gasturbinen (1900) standen jedoch Konkurrenztechnologien zur Verfügung, welche die Weiterentwicklung der Brennstoffzellentechnologie vorerst zum Erliegen brachte.

Ab ca. 1930 experimentierte der britische Wissenschaftler Francis Thomas Bacon (1904-1992) mit alkalischen anstelle der bis dahin verwendeten sauren Elektrolyten. Dies sollte

die starke Korrosion der Elektroden vermeiden, was auch durch die Verwendung von hochkonzentrierter Kalilauge (KOH) gelang. Um die Produktionskosten zu senken verwendete er anstelle der teuren Edelmetallkatalysatoren gesinterten Nickel. Mit diesen Veränderungen gelang es Bacon eine Brennstoffzelle zu entwickeln, die eine Leistung von 5 kW brachte und großes Aufsehen erregte. Das erste durch diese Technik angetriebene Fahrzeug entwickelten, auf der Grundlage von Bacons Arbeit, die Forscher Allis und Chalmers. Es handelte sich dabei um einen Traktor, welcher von einem Stapel von 1000 Zellen bestückt war, und 15 kW Leistung lieferte. Durch das Interesse des Militärs und der Weltraumbehörde NASA konnte die Brennstoffzellentechnik in den folgenden Jahren erheblich verbessert werden [SCH05].

Die zivile Nutzung der Brennstoffzelle wurde in den letzten Jahren interessant. So wurden viele neue Konzepte und Technologien entwickelt, mit denen die Leistungsfähigkeit kontinuierlich gesteigert und die Kosten gesenkt werden konnten. Inzwischen reichen die Einsatzgebiete von Fahrzeugantrieben, Hausheizungen und Blockheizkraftwerken bis in den Bereich der Kleinanwendungen wie Handys oder mobile Computer.

3.1.2 Funktionsweise der Brennstoffzelle

Brennstoffzellen sind elektrochemische Energiewandler, die aus Wasserstoff (H_2) und (Luft-) Sauerstoff (O_2) elektrische Energie, reines Wasser und Wärme erzeugen. Dieser Vorgang ist somit die Umkehrung der Elektrolyse. Wasserstoff und Sauerstoff sind von sich aus bestrebt zu Wasser zu reagieren (Knallgasreaktion). Dazu bedarf es keiner externen Energiezufuhr, stattdessen wird bei dieser exothermen Reaktion Energie abgegeben. Die Vorgänge im Inneren einer Brennstoffzelle werden im folgendem am Beispiel einer „Proton Exchange Membran Brennstoffzelle“ (kurz PEM-Brennstoffzelle) erläutert. Neben dieser gibt es mehrere andere Brennstoffzellentypen, die jedoch von der Funktionsweise ähnlich sind.

Das Herz einer PEM-Brennstoffzelle ist die Membran Elektroden Einheit (kurz MEA- engl.: **M**embrane **E**lectrode **A**ssembly). Sie besteht aus einer ionendurchlässigen Polymer-Membran, welche die Funktion des Elektrolyten einnimmt. Diese Membran ist gasdicht, damit Wasserstoff und Sauerstoff nicht direkt miteinander reagieren können. Sie ist ebenfalls elektrisch isolierend, damit die Elektronen sie nicht passieren können. Für Wasserstoffionen (Protonen) muss sie allerdings durchlässig sein. Die Membran wird oftmals beidseitig mit einem Edelmetallkatalysator beschichtet. Die Katalysatorschicht besteht meist aus Platin oder Platin-Legierungen, da der stark saure Charakter der Membran niederwertigere Metalle angreifen würde. Diese Katalysatoren ermöglichen bzw. beschleunigen die chemischen Reaktionen, ohne jedoch selbst an der Reaktion teilzunehmen. Aus diesem Grunde werden die Katalysatoren auch nicht verbraucht. Fixiert wird die Anordnung über Bipolarplatten, wobei eine als Anode und die andere als Kathode fungiert. Diese Bipolarplatten verfügen über Kanäle, für die Zufuhr der Reaktionsmedien und die Abfuhr des Reaktionsproduktes. Die Bipolarplatten sind elektrisch leitfähig, um die elektrische Kontaktierung nach außen oder zu einer reaktiven Nachbarzelle zu ermöglichen. Zwischen der MEA und den Bipolarplatten befinden sich oft eine elektrisch leitfähige, fein-

porige Gasdiffusionslage (kurz GDL- engl.: **Gas Diffusion Layer**). Diese GDL sorgt für eine optimale Verteilung und Heranführung der Reaktionsgase an die Membran. Eine einzelne Zelle liefert Spannungen von ca. 1 V. Um eine höhere Spannung zu erhalten werden mehrere Zellen zu einem Brennstoffzellen-Stack in Reihe zusammengeschaltet. Der prinzipielle Aufbau einer Brennstoffzelle ist in Abbildung 3 zu sehen.

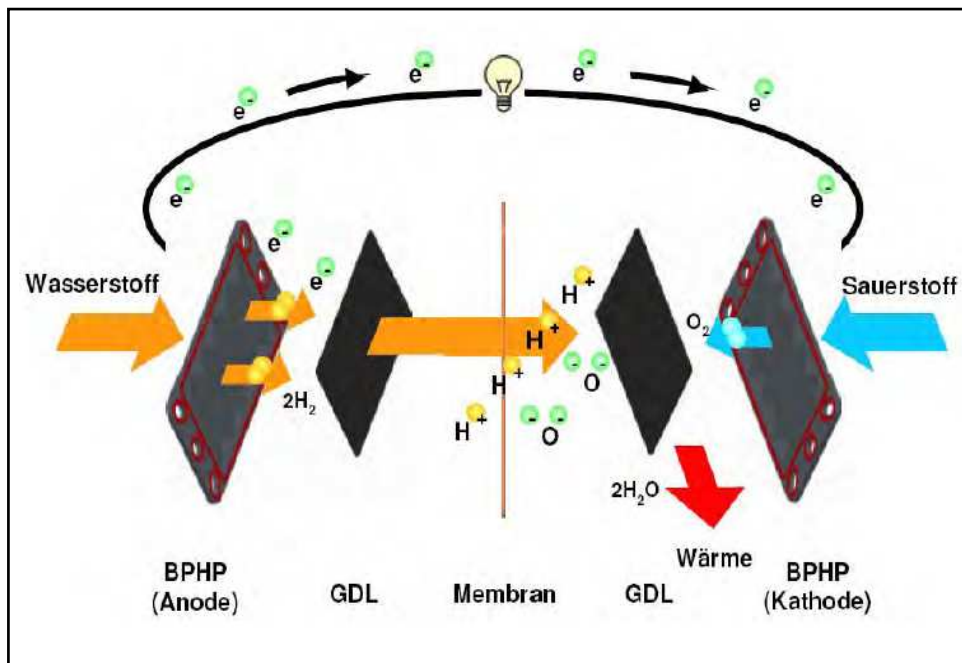
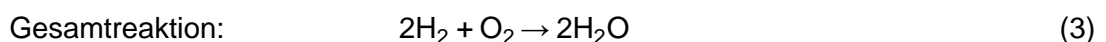
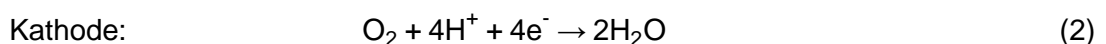
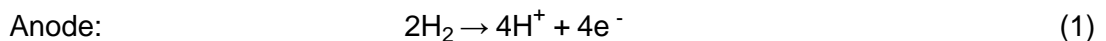


Abbildung 3: Aufbau und Funktionsprinzip einer PEM-Brennstoffzelle [ZIM11]

Der Wasserstoff wird auf der Anodenseite über eine Bipolar-Halbplatte zugeführt, und mit Hilfe des Katalysators in Wasserstoffionen (Protonen H^+) oxidiert. Die Wasserstoffionen wandern durch die Protonenleitende Membran zur Kathode. Dadurch entsteht zwischen der Anode und Kathode ein Potential-Unterschied. Die freien vom Wasserstoff stammenden Elektronen (e^-) wandern zur Nachbarzelle oder über den äußeren Stromkreis zur Kathode, und können so einen Verbraucher antreiben. Auf der Kathodenseite wird der (Luft-) Sauerstoff durch Aufnahme der Elektronen reduziert, und verbindet sich zusammen mit den Protonen zu Wasser, unter Abgabe von thermischer Energie. An der Anode und der Kathode laufen dabei folgende Reaktionen ab.



Als Brennstoffe können neben Wasserstoff auch andere Kraftstoffe wie Erdgas, Kohlegas, Klärgas, Biogas oder Methanol verwendet werden, jedoch müssen diese vorher einem

Reformierungsprozess unterzogen werden, um den enthaltenen Wasserstoff abzutrennen. PEM-Brennstoffzellen gehören zu den Niedertemperatur-Brennstoffzellen und können bei relativ niedrigen Temperaturen (bis 100 °C) betrieben werden. Demgegenüber stehen Hochtemperatur-Brennstoffzellen, die bei Temperaturen bis zu 1000 °C arbeiten. Der Vorteil von Niedertemperatur-Brennstoffzellen liegt darin, dass sie relativ schnell an- und abgeschaltet werden können. Jedoch benötigen sie eine höhere Brenngas-Reinheit als Hochtemperatur-Brennstoffzellen, welche einen gewissen Prozentsatz Verunreinigungen tolerieren.

Als Endprodukte entstehen in einer Brennstoffzelle Gleichstrom und Wasser bzw. Wasserdampf. Die theoretisch mögliche Spannung einer PEM-Brennstoffzelle ergibt sich aus den Standard-Elektrodenpotentialen und liegt, bei Standardbedingungen, bei 1,23 V [KEL09], da gilt:

$$E = E_{\text{Kathode}}^0 - E_{\text{Anode}}^0 \quad (4)$$

Daraus folgt für eine mit Wasserstoff und Sauerstoff betriebene PEM-Brennstoffzelle:

$$E = E_{\text{O}}^0 - E_{\text{H}_2}^0 = 1,23 \text{ V} - 0 \text{ V} = 1,23 \text{ V} \quad (5)$$

In der Praxis wird jedoch nur eine reale Spannung von ca. 0,7 V erreicht, da es beim Betrieb zu Verlusten im Inneren der Brennstoffzelle kommt. Erst mehrere, zu einem Stack in Reihe geschaltete, Brennstoffzellen liefern eine ausreichend hohe Leistung. „Für Brennstoffzellen-Stacks gilt:

- Die Anzahl der Zellen innerhalb des Stacks bestimmt die Spannung.
- Die Größe der Membranfläche bestimmt die Stromstärke.
- Die Größe des Brennstoffzellen-Stacks bestimmt die Leistung.
- Die Größe des Brennstoff-Reservoirs bestimmt die Betriebsdauer.“ [GEI04]

3.1.3 Brennstoffzellenarten

Neben den PEM-Brennstoffzellen stehen noch verschiedene Arten zur Verfügung. Die Unterscheidung findet dabei vor allem nach der Art des Elektrolyten und der Betriebstemperatur statt. Typische Arbeitstemperaturen für Niedertemperatur-Brennstoffzellen (NT) liegen zwischen 0 °C und 100 °C. Mitteltemperatur-Brennstoffzellen (MT) arbeiten bei Temperaturen von 100 °C bis 250 °C und Hochtemperatur-Brennstoffzellen (HT) bei Temperaturen deutlich über 250 °C. Die folgende Tabelle gibt einen groben Überblick über die unterschiedlichen Brennstoffzellentypen.

Typ	Kraftstoff	Betriebs-temperatur [°C]	Elektrolyt	Elektrolyt leitfähig für:	Temperaturbereich
AFC (Alkalische Brennstoffzelle)	H ₂	60-80	Wässrige Kalilauge	OH ⁻ - Ionen	NT
DMFC (Direkt-Methanol-Brennstoffzelle)	CH ₃ OH Methanol	60-100	Protonen-leitende Membran	H ⁺ - Ionen	NT
PEMFC (Polymer-elektrolytmembran-Brennstoffzelle)	H ₂	60-80	Protonen-leitende Membran	H ⁺ - Ionen	NT
PAFC (Phosphorsäure-Brennstoffzelle)	H ₂	180-220	Konzentrierte Phosphorsäure	H ⁺ - Ionen	MT
MCFC (Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle)	H ₂ (CH ₄ , Biogas)	650	Karbonat-schmelze	CO ₃ ²⁻ - Ionen	HT
SOFC (Oxidkeramische-Brennstoffzelle)	H ₂ (CH ₄)	850-1000	Dotiertes Zirkonium-dioxid	O ²⁻ - Ionen	HT

Tabelle 1: Brennstoffzellenarten [GEI04]

3.1.4 Effizienz

Die Umwandlung chemischer Energie eines Brennstoffes in elektrische Energie findet zurzeit hauptsächlich in Wärmekraftmaschinen statt. Dabei wird die Energie des Brennstoffes zunächst durch Verbrennung in thermische Energie umgewandelt, danach in Bewegungsenergie und schließlich über einen Generator in elektrische Energie. Diese Wärmekraftmaschinen unterliegen dabei den Gesetzmäßigkeiten des Carnot-Prozesses mit einem maximalen Wirkungsgrad von:

$$\eta_C = 1 - \frac{T_U}{T_O} \quad (6)$$

η_C : Carnot-Wirkungsgrad

T_U : Umgebungstemperatur [K]

T_O : obere Systemtemperatur [K]

Die Energieausbeute realer Systeme ist jedoch um einiges niedriger als der Carnot-Wirkungsgrad. Kleine und mittlere Stromerzeuger erreichen lediglich Wirkungsgrade von 25-30 %, Kraftwerke und stationäre Diesel-Aggregate kommen auf Maximalwerte von 40 % [GEI04].

Die im Wasserstoff gespeicherte chemische Energie wird in der Brennstoffzelle direkt in elektrische Energie umgewandelt. Der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle ist nun nicht wie bei den Wärmekraftmaschinen durch den Carnot-Faktor nach oben begrenzt. In Brennstoffzellen gilt dagegen der Gibbs-Helmholtz-Wirkungsgrad.

$$\eta_{Br} = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (7)$$

η_{Br} : Brennstoffzellen-Wirkungsgrad

ΔG : freie Reaktionsenthalpie

ΔH : Reaktionsenthalpie

Dabei sinkt der theoretisch mögliche Wirkungsgrad linear mit steigender Betriebstemperatur. Es ergibt sich ein idealer Wirkungsgrad für Brennstoffzellen bei flüssigen Produktwasser von $\eta_{ideal,0} = 83,3 \%$ [KRE08]. Abbildung 4 zeigt, dass der theoretische Wirkungsgrad einer Brennstoffzelle gerade im Niedertemperaturbereich deutlich über dem Carnot-Wirkungsgrad liegt.

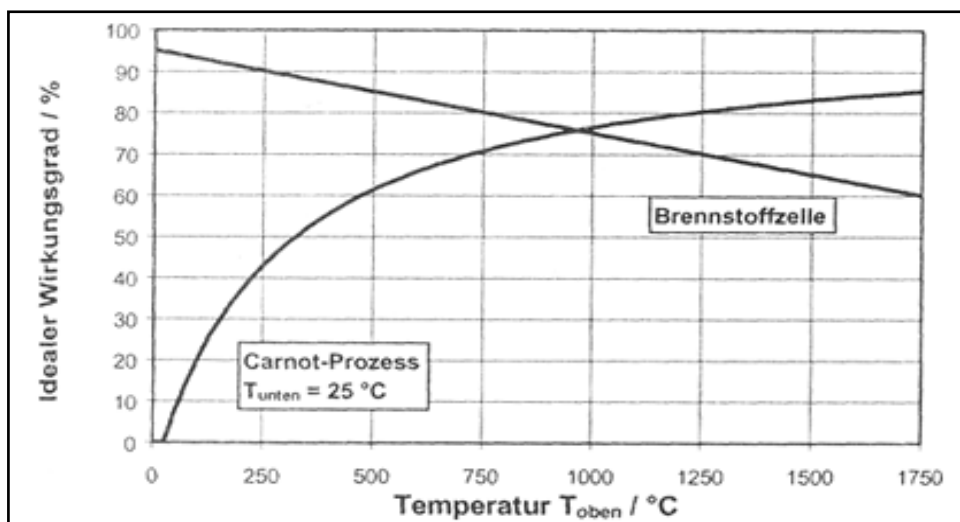


Abbildung 4: theoretische Wirkungsgrade im Vergleich [WAS13]

Die real erreichbaren Wirkungsgrade von Brennstoffzellen liegen jedoch zurzeit noch deutlich unter den theoretisch erreichbaren. Der maximal erreichte elektrische Wirkungsgrad liegt derzeit je nach Brennstoffzellentyp bei 30-50 % [GEI04].

3.1.5 Die Bipolarplatte

Bipolarplatten sind der mechanische Hauptbestandteil von Brennstoffzellen-Stacks. Sie sorgen für einen elektrisch leitfähigen Kontakt zur angrenzenden GDL, führen die Ausgangsstoffe dem System zu und verteilen diese gleichmäßig über die aktive Fläche der Membran. Zu diesem Zweck sind in die Bipolarplatten mäanderförmig Kanäle eingebracht. Desweiteren leiten sie die Produktstoffe und die Prozesswärme aus dem Zellenstapel ab. Für die Kühlung sind auf der Rückseite der Platte Kühlkanäle eingebracht. An dieser Seite werden sie oft mit einer zweiten Platte aneinander gepresst. Aus diesem Grund nennt man sie auch Bipolar-Halbplatten. Sie sind somit die thermisch und elektrisch leitfähigen Kontaktplatten zwischen den einzelnen aktiven Zellen. Während des elektrochemischen Prozesses sorgen sie für einen möglichst optimalen elektrischen Kontakt, um die freiwerdenden Elektronen von der Anodenseite (Brenngas) zur Kathodenseite (Sauerstoffseite) der Nachbarzelle zu leiten und damit die Reihenschaltung der Zellen zu gewährleisten. Abbildung 5 zeigt ein 3D-Modell der Vor- und Rückseite einer Bipolar-Halbplatte vom Zentrum für Brennstoffzellen Technik GmbH (ZBT) in Duisburg.

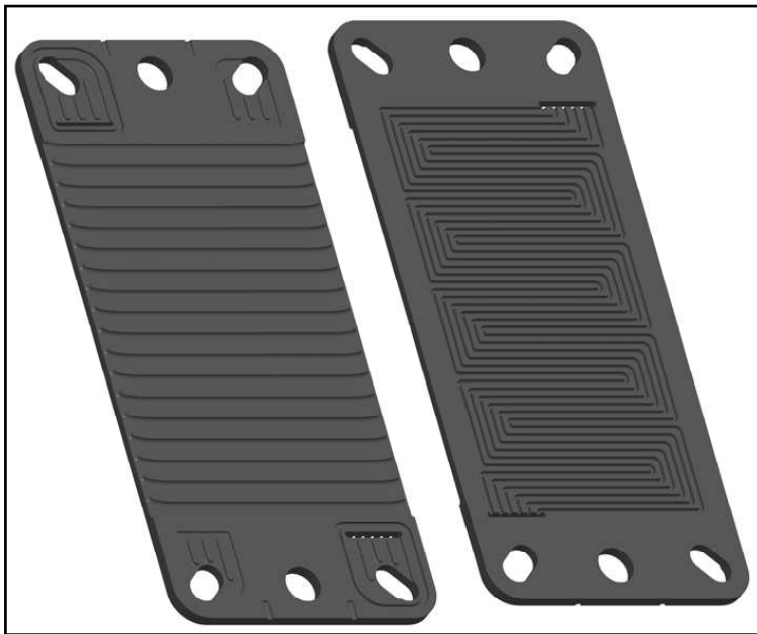


Abbildung 5: 3D-Modell der Vor- und Rückseite einer Bipolar-Halbplatte [KRE08]

Neben den oben erwähnten Eigenschaften müssen Bipolarplatten den aggressiven chemischen Bedingungen, in einer aktiven Brennstoffzelle, möglichst widerstehen können. Um die Ausgangsstoffe zwischen den aktiven Zellen voneinander zu trennen ist es erforderlich, dass die Bipolarplatten gasdicht sind und keine Porosität aufweisen. Ebenfalls muss sie die gesamte mechanische Krafteinleitung, zur Erhöhung der elektrischen Kontaktierung und zur Abdichtung, aufnehmen. Zur Abdichtung der Ausgangsstoffe zueinander und zur Umgebung sind auf die Platten Dichtungen aufgebracht. Werden die Bipolarplatten nun mit der MEA verpresst bilden sie zusammen mit der Dichtung die Brennstoffzelle, wie in Abbildung 6 dargestellt.

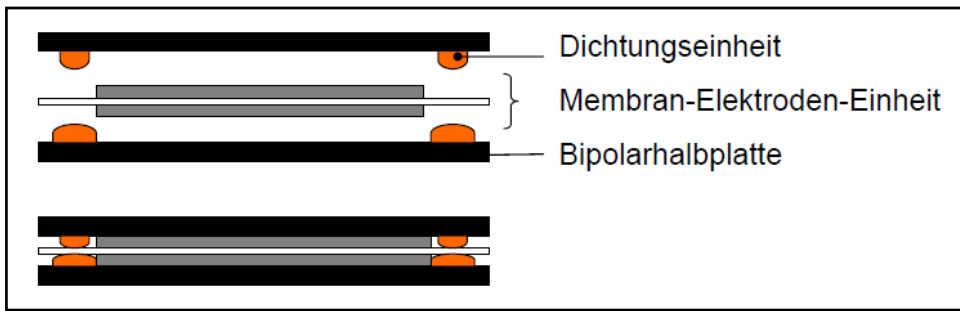


Abbildung 6: Bipolar-Halbplatte mit Dichtungseinheit und MEA [HEI09]

In der vorliegenden Arbeit sollen Bipolarplatten wie in Abbildung 5 bearbeitet werden.

3.1.5.1 Bipolarplattenmaterial

Besonders geeignete Materialien für Bipolarplatten sind Edelstahl bzw. alle metallische Werkstoffe und Kunststoff-Compoundwerkstoffe auf Graphitbasis. Die hier betrachteten Bipolarplatten bestehen aus hochgefüllten thermoplastisch gebundenem Compound. Der Begriff Compound bezeichnet dabei einen Kunststoff, welcher durch die Beimischung anderer Füllstoffe neue Materialeigenschaften aufweist. Hochgefüllte Compounds werden Gemische genannt, die einen vergleichsweise geringen Anteil an Kunststoff und daher einen großen Anteil Füllmaterial aufweisen. In der vorliegenden Arbeit werden Bipolarplatten aus Graphit-Polypropylen-Compound betrachtet. Diese bestehen zu 80 Gew.-% aus Graphit und zu 20 Gew.-% aus Polypropylen und sollen somit vorrangig die Eigenschaften des Graphits aufweisen. Graphit zeichnet sich besonders durch seine chemische Resistenz und seine gute elektrische und thermische Leitfähigkeit aus. Die elektrische und thermische Leitfähigkeit ist jedoch aufgrund der speziellen Gitterstruktur des Graphits richtungsabhängig. Dieses anisotrope Verhalten erklärt sich daraus, dass Graphit in einer hexagonal ebenen Kristallgitterstruktur, wie in Abbildung 7 dargestellt, vorliegt. Dabei sind in den Kristallflächenebenen sehr hohe Leitwerte möglich, wohingegen die Leitwerte senkrecht zu diesen Ebenen stark abfallen [KRE08].

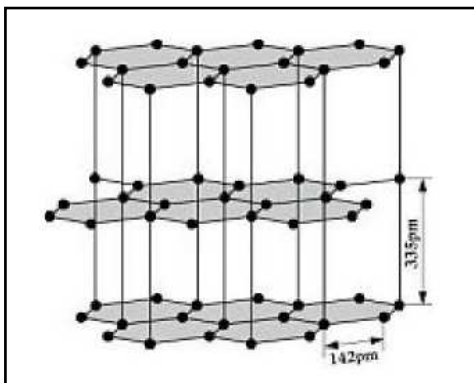


Abbildung 7: Hexagonale Schichtgitter-Kristallstruktur von Graphit [BAY13]

Einige technische Kennwerte reinen Graphits sind in Tabelle 2 zu sehen.

Sublimationspunkt [C°]	3750	
Dichte [g/cm³]	2,26	
thermische Ausdehnung [K⁻¹]	$0,7 \cdot 10^{-6}$	
Stromleitfähigkeit σ_G [S/cm]	parallel senkrecht Anisotropie	$2,6 \cdot 10^4$ 2,6 10^4
Wärmeleitfähigkeit λ_G [W/mK]	parallel senkrecht Anisotropie	1500 5 300
E-Modul [GPa]	parallel senkrecht Anisotropie	1000 36 30
Biegefestigkeit [MPa]	10	

Tabelle 2: Kenndaten von reinem Graphit (Monokristall) [ÖZT12]

Reiner Graphit ist nur spanend und somit aufwendig zu verarbeiten. Aus diesem Grund wird dem Graphit der geringe Kunststoffanteil beigemischt, um dem Compound die dem reinen Graphit fehlenden Eigenschaften wie höhere Biegefestigkeit, geringere Sprödbrechneigung und Gasdichtheit zu verleihen. Zusätzlich können Graphit-Polypropylen-Compounds mit gängigen Massenproduktionsverfahren wie dem Spritzgießen hergestellt werden. Bei der Herstellung durch Spritzgießen werden jedoch die Oberflächen der Platten durch das im Material enthaltene Bindemittel geglättet. Dies führt zu einer „Einhüllung“ der gut leitenden Graphit-Partikel und damit zu einer Verschlechterung des elektrischen Widerstandes in der Nähe der Oberfläche [GR111].

3.2 Laserabtragen

Beim Laserstrahlabtragen wird Material durch thermische Energie von der Oberfläche entfernt. Daher ist dieses Verfahren nach DIN 8580 den trennenden Fertigungsverfahren zugeordnet. Je nach Lasersystem und Anwendungsgebiet existieren unterschiedliche Abtragsmechanismen. Tabelle 3 zeigt die verschiedenen Abtragsmechanismen und typische Verfahrensparameter bei der Bearbeitung von Stahl.

Laserstrahl-abtragverfahren	Abtragsrate [mm ³ /min]	Oberflächenrauheit R _z [µm]	Typische Laserstrahlquelle
Schmelzabtrag	>1000	50-100	CO ₂ -Laser
Oxidabtrag (Laserspanen)	>10	20	CO ₂ -Laser
Excimerabtragen	<0,1	<1	Excimerlaser
Sublimationsabtragen	<10	>1	Festkörperlaser

Tabelle 3: Verfahrensvarianten des Laserabtragens [KLO07]

Bei allen Abtragsverfahren wird ein fokussierter Laserstrahl auf die Oberfläche gerichtet, so dass dieser absorbiert wird und die randnahe Oberfläche erhitzt (Ausnahme Excimerabtrag). Dabei wird die photonische Energie des Laserstrahls absorbiert, und in thermische Energie umgewandelt. Der Wirkungsgrad dieser Umwandlung wird bestimmt durch den Absorptionsgrad des Werkstoffes in Abhängigkeit der Laserwellenlänge, Oberflächenrauheit, Einstrahlwinkel und Temperatur.

Beim Schmelzabtrag wird der Werkstoff lokal aufgeschmolzen, und die Schmelze typischerweise durch einen über eine koaxiale Düse zugeführten Prozessgasstrom vom Werkstoff entfernt. Wird als Prozessgas Sauerstoff eingesetzt entsteht in der Schmelze eine partielle Oxidation. Dadurch wird eine exotherme Reaktion hervorgerufen, was einen zusätzlichen Energieeintrag zur Folge hat. Somit können die hohen, in Tabelle 3 dargestellten, Abtragsraten erzielt werden. Jedoch können bei diesem Prozess Schmelzrückstände auf der Bauteiloberfläche zurück bleiben, welche gegebenenfalls durch eine Nachbearbeitung entfernt werden müssen. Die auf diese Weise erzeugten Oberflächen entsprechen daher eher geschruppten Flächen [KLO07].

Eine ähnliche Variante ist das Laserstrahloxidabtragen. Bei diesem Verfahren wird Sauerstoff als Prozessgas eingesetzt und dem Material nur so viel Laserstrahlenergie zugeführt, wie für eine lokale Oxidation erforderlich ist. Dadurch wird die Schmelze nahezu komplett oxidiert, und es hebt sich, aufgrund der in der Abkühlphase induzierten Spannungen, selbständig eine Oxidraupe von der Oberfläche ab. Ein entfernen der Schmelze ist bei diesem Verfahren nicht notwendig. Ein stabiler Prozess ist jedoch nur in einem engen Parameterfenster möglich, da es ab einem kritischen Sauerstoffdruck zu unkontrol-

lierten exothermen Reaktionen und somit zu einer Störung des Prozesses kommen kann. Das Laserstrahloxidabtragen eignet sich besonders für das Schlichten [KOR07].

Das Excimerabtragen geschieht unter Verwendung eines gepulsten Excimerlasers, welcher als aktives Medium ein Gas verwendet. Dieses Gas ist ein Kunstmolekül aus einem Edelgas (z.B. Ar, Kr, Xe) und einem Halogen (z.B. F, Cl). Bei diesen Lasern hängen Pulsenergie und Wellenlänge von der Gaszusammensetzung ab. Es können dabei Wellenlängen im ultravioletten Bereich erzeugt werden. Durch die hohen Photonenenergien werden die atomaren Bindungen des Werkstoffes photolytisch aufgebrochen, und das gelöste Material mit Hilfe eines zusätzlichen Gases von der Bearbeitungsstelle getrieben. Dadurch wird die Werkstoffoberfläche kaum thermisch beeinflusst. Hauptanwendung findet das Excimerabtragen bei organischen Materialien, Polymeren und Keramiken. Metalle lassen sich dagegen nur sehr eingeschränkt bearbeiten. Bei diesen Verfahren wird der Bearbeitungsstrahl über eine Maske auf die Bauteiloberfläche projiziert. Das Maskenverfahren ist jedoch sehr unflexibel und kostenintensiv, da für jede Struktur eine neue Maske angefertigt werden muss [KLO07].

Das am häufigsten eingesetzte Laserstrahlabtragsverfahren ist das Sublimationsabtragen. Dabei wird durch gepulste, fokussierte Laserstrahlung ein paraboloidförmiger Abtrag (Einzelpulskrater) auf der Werkstückoberfläche erzeugt. Das Material geht dabei unmittelbar vom festen in den gasförmigen Aggregatzustand und es entsteht ein kraterartiges Näpfchen. Dieses Näpfchen entspricht weitestgehend dem negativen Abbild des Laserstrahlprofils. Der Durchmesser sowie die Tiefe des Näpfchens werden durch die thermisch-mechanischen Eigenschaften des Materials, den gewählten Optiken sowie den Prozessparametern bestimmt. Die Prozessparameter sind dabei z.B. Wellenlänge, Pulslänge und Laserstrahlintensität. Durch die Überlappung von Einzelpulsen können dreidimensionale Strukturen bzw. ein flächiger Abtrag realisiert werden [LOR07]. Um eine vollständige Sublimation zu gewährleisten, sind hohe Intensitäten notwendig. Diese Intensitäten sind vom zu bearbeitenden Werkstoff abhängig. Bei zu geringen Strahlintensitäten erfolgt eine Kombination aus Sublimations- und Schmelzabtrag, was durch Schmelzrückstände am Strukturrand gekennzeichnet ist. Um einen Abtrag zu ermöglichen ist es notwendig das zu bearbeitende Material mit einer Intensität oberhalb einer bestimmten materialabhängigen Schwelle zu bestrahlen. Unterhalb dieser Schwelle wird das Material lediglich erwärmt oder aufgeschmolzen. In der Materialbearbeitung wird oft der Begriff der Fluenz verwendet. Die Fluenz ist dabei, bei konstanter Pulsdauer, als Energie pro Fläche bestimmt. Um die Schwellfluenz zu bestimmen wird folgender Zusammenhang zwischen dem Radius der ablatierten Zone (r) und der Spitzenfluenz (F_0) benutzt.

$$F(r) = F_0 \cdot \exp \left[-2 \cdot \left(\frac{r}{\omega_0} \right)^2 \right] \quad (8)$$

ω_0 : Gaußscher Radius

Betrachtet man den Radius r_s , welcher bei Erreichen der Schwellfluenz F_s entsteht folgt:

$$F_s = F_0 \cdot \exp \left[-2 \cdot \left(\frac{r_s}{\omega_0} \right)^2 \right] \quad (9)$$

Durch Umformen ergibt sich ein Zusammenhang zwischen dem Durchmesser der ablatierten Zone d_s und der Maximalfluenz.

$$d_s^2 = 2 \cdot \omega_0^2 \cdot \ln \left(\frac{F_0}{F_s} \right) \quad (10)$$

Die Spitzenfluenz F_0 lässt sich aus der Pulsenergie E_{Puls} wie folgt bestimmen:

$$F_0 = \frac{2 \cdot E_{\text{Puls}}}{\pi \cdot \omega_0^2} \quad (11)$$

Die Pulsenergie berechnet sich aus der mittleren Leistung P_{av} und der Repetitionsrate f_p zu:

$$E_{\text{Puls}} = \frac{P_{\text{av}}}{f_p} \quad (12)$$

Diese Beziehungen lassen sich nutzen um, aus den bekannten Laserparametern und den im Experiment ermittelten Durchmessern der ablatierten Zone, die Schwellfluenz zu ermitteln [FLE05].

3.2.1 Laserstrukturieren

Das Laserstrahlabtragen ist ein Sammelbegriff für unterschiedliche Bearbeitungstechnologien. Hierbei unterscheidet man zwischen Entschichten, Flächenabtragen und Formabtragen. Das Laserstrahlstrukturieren gehört dabei zur Gruppe Formabtragen, wie in Abbildung 8 gezeigt. Dabei werden kleine und filigrane Strukturen mittels gepulster Laserstrahlung auf die Oberfläche aufgebracht. Je nach eingesetzter Laserstrahlquelle unterscheidet man zwischen den oben erwähnten Excimer- und Sublimationsabtragen.

Beim Excimer-Verfahren erzielen die eingesetzten Laser nur geringe mittlere Leistungen [KLO07]. Somit werden nur geringe Abtragstiefen erreicht, was zu längeren Bearbeitungszeiten führt. Das Abbilden der benötigten Geometrie erfolgt durch das Maskenverfahren, wobei die Masken für jede Struktur einzeln angefertigt werden müssen. Aufgrund der geringen Abtragstiefen und des aufwendigen Maskenverfahrens wird dieses Verfahren größtenteils bei Strukturgrößen im Nanobereich angewendet.

Beim Sublimations-Verfahren wird mit jedem Laserpuls Material in Form eines Nöpfchens von der Bearbeitungsoberfläche entfernt. Durch aneinanderreihen dieser Nöpfchen können komplexe dreidimensionale Strukturen erzeugt werden. Die Ablenkung und Fokussierung erfolgt bei diesem Verfahren überwiegend durch Galvanoscannersysteme.

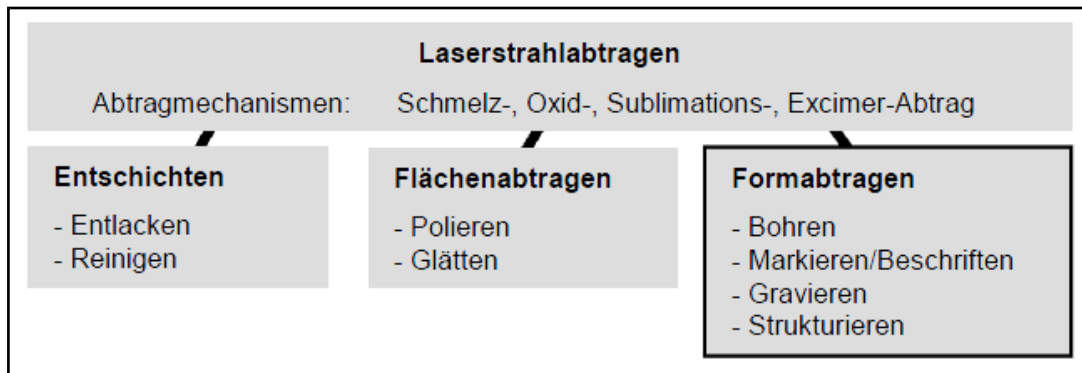


Abbildung 8: Mechanismen und Verfahrensvarianten des Laserabtrags [KOR07]

3.2.2 Maskenverfahren

Bei der Strukturierung mittels Maskenverfahren beleuchtet der Laserstrahl eine Schablone, welche die zu übertragende Geometrie enthält. Die Schablone kann dabei direkt auf das Material aufgebracht sein oder deren Abbild wird über eine Linse und eine Zwischenebene auf das Werkstück projiziert.

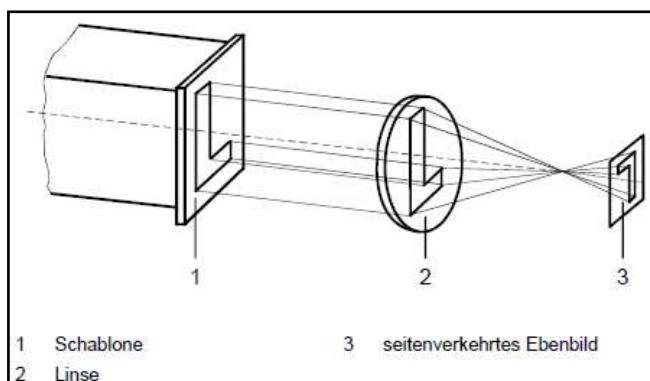


Abbildung 9: Schema Maskenverfahren [TRU06]

Der auf diese Weise modifizierte Laserstrahl erzeugt auf der Werkstückoberfläche ein verkleinertes, seitenverkehrtes Abbild der Maske. Das Strahlprofil sollte bei diesem Verfahren eine möglichst homogene Intensitätsverteilung aufweisen (Top-Hat-Profil). Die gesamte Maskeninformation kann bei diesen Verfahren durch einen Laserpuls übertragen werden, falls die Maske nicht größer als der Strahldurchmesser ist. Andernfalls muss die Maske oftmals, örtlich versetzt durchleuchtet werden.

3.2.3 Scannerverfahren

Beim Scannerverfahren wird der Laserstrahl, über zwei bewegliche Spiegel und eine fokussierende Optik, auf die Werkstückoberfläche gelenkt. Die Bewegung der Spiegel ver-

ursacht eine Bewegung des Strahls in x- und y-Richtung mit hoher Geschwindigkeit (mehrere Meter pro Sekunde) über das Werkstück.

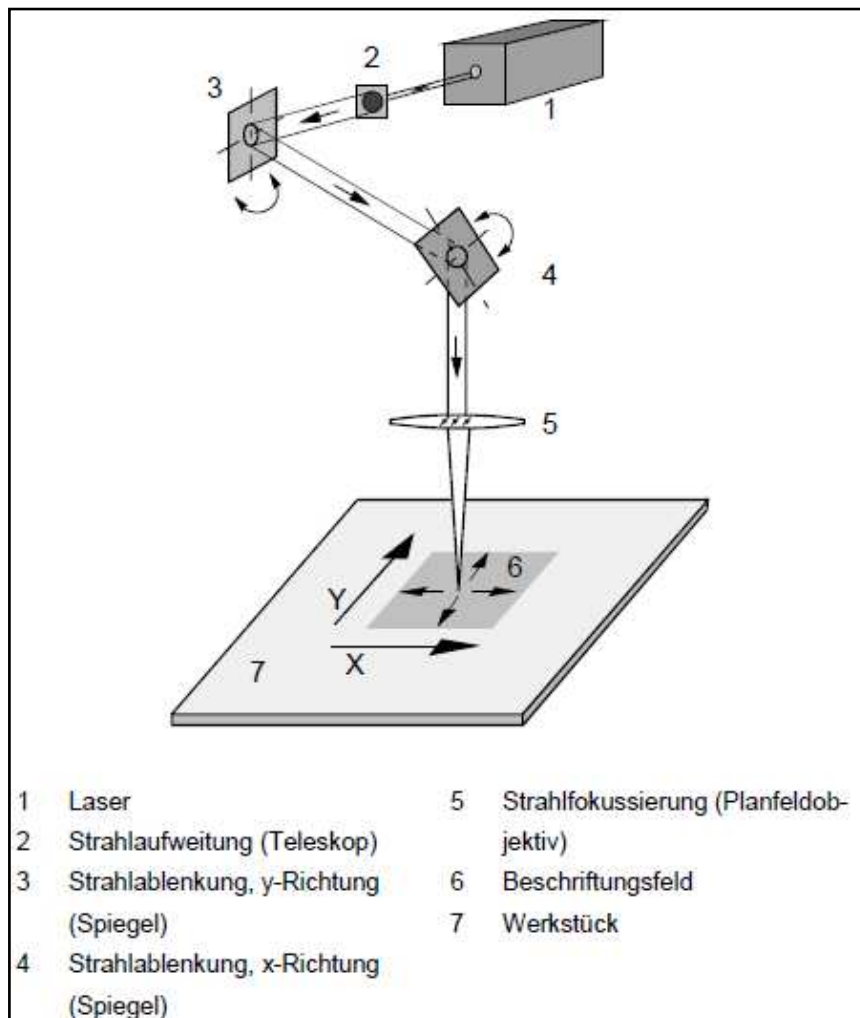


Abbildung 10: Schema Scannerverfahren [TRU06]

Der Laserstrahl „zeichnet“ die gewünschte Abbildung auf die Werkstückoberfläche. Das Schriftbild besteht aus einer Vielzahl einzelner Linien bzw. einer Vielzahl einzelner Krater. Mit diesem Verfahren lassen sich sehr flexibel unterschiedlichste Abtragsgeometrien realisieren.

4 Versuchsvorbereitung

4.1 Strukturierungsziel

Um die Widerstandswerte der Bipolarplatten zu verbessern ist es wichtig die schlecht leitende Schicht, welche sich beim Herstellungsprozess entwickelt, zu entfernen. Derzeitig wird diese Schicht durch einen Fräsvorgang entfernt. Dieser zusätzliche Arbeitsgang soll jedoch durch eine Laserbearbeitung ersetzt werden. Zurzeit wird auf jeder Seite der Platten 100 μm abgefräst. Somit ist die Aufgabe der vorliegenden Arbeit einen Flächenabtrag von ca. 100 μm zu realisieren. Dieser Flächenabtrag soll auf der gesamten Rückseite und im Flow Field Bereich der Vorderseite (schwarzer Bereich in Abbildung 1) erfolgen. Durch den Herstellungsprozess mittels Spritzgießen entstehen Erhebungen durch die Auswerferstifte wie in Abbildung 11 zu sehen. Diese Erhebungen sind unerwünscht und sollten durch eine Überarbeitung des Spritzgusswerkzeuges beseitigt werden. In der vorliegenden Arbeit müssen diese Erhebungen jedoch zusätzlich flächig abgetragen werden.



Abbildung 11: Bipolarplatte mit Erhebungen der Auswerferstifte

Für die Verbesserung des Kontaktwiderstandes zwischen den Bipolarplatten ist eine Linienstruktur mit V-förmigen Querschnitt auf der Rückseite der Bipolarplatten vorgesehen. Vorversuche am ZBT-Duisburg zeigten die besten Ergebnisse bei Flankenwinkeln zwischen 60° und 70°. Die Linienstrukturen werden somit mit unterschiedlichen Winkeln von 60°, 65° und 70° erzeugt, und anschließend in Duisburg vermessen.

Damit sich der Kontaktwiderstand zwischen der Bipolarplatte und der GDL reduziert, wird anschließend eine Gitterstruktur mit unterschiedlichen Tiefen im Flow Field Bereich der Platte erzeugt. Für diese Strukturen wurden der Kreuzlinienabstand mit 120 µm und die Tiefen mit 30, 80, 130 und 180 µm vom ZBT-Duisburg vorgegeben.

Für die Erhöhung der Haftungseigenschaften muss eine dritte Struktur hergestellt werden. In Vorversuchen zeigte sich eine ausreichende Verbesserung durch eine Punktstruktur, wobei die Punktabstände 200 µm und die Strukturtiefe ca. 80 µm betrugen. Diese Struktur soll im Dichtungsbereich (roter Bereich in Abbildung 1) hergestellt werden.

4.2 Versuchsplanung

Flächenabtrag:

In den folgenden Versuchen wird zuerst ein flächiger Abtrag realisiert, um die schlechtleitende Schicht auf den Bipolarhalbplatten zu entfernen. Dafür wird in der Material-Bearbeitungs-Software ein Rechteck programmiert, und dieses Rechteck durch Linien gefüllt. Die Pulswiederholfrequenz sollte für diesen Zweck auf das Leistungsmaximum, und die Pulsdauer so gering wie möglich eingestellt werden, da bei kürzeren Pulsen eine bessere Oberflächenqualität zu erwarten ist [SCH07]. Die einzustellende Vorschubgeschwindigkeit ergibt sich aus dem Pulsüberlapp. Dieser wird nach Formel (13) wie folgt berechnet.

$$\ddot{U} = \left(1 - \frac{v}{f_p \cdot d_f}\right) \cdot 100 \quad (13)$$

v : Vorschubgeschwindigkeit

f_p : Repetitionsrate

d_f : Spotdurchmesser

Für die ersten Versuche wird der Pulsüberlapp auf 0 % eingestellt. Der Abstand der Fülllinien zueinander wird als Spurüberlapp bezeichnet, und in den folgenden Versuchen mit dem gleichen Wert wie der Pulsüberlapp bearbeitet. Anschließend wird der Einfluss der Laserleistung, des Puls- und Spurüberlapps und der Anzahl der Überfahrten untersucht. Sind dafür geeignete Parameter gefunden worden kann die Platte ausgerichtet und sowohl die Erhebungen der Auswerferstifte als auch der Flow Field Bereich abgetragen werden.

Linienstruktur mit V-förmigen Querschnitt:

Zur Erzeugung der V-Nut, mit variablen Winkeln, werden die Parameter des Flächenabtrages zunächst beibehalten. In der Beschriftungssoftware wird anschließend ein Rechteck programmiert, wobei die Breite des Rechtecks einem Vielfachen des ermittelten Spurüberlapps entspricht, um einen Flächenabtrag zu realisieren. Anschließend soll ein weiteres Rechteck einen zweiten Flächenabtrag erzeugen, jedoch mit einer geringeren Breite. Der Breitenunterschied wird im folgendem als Schrittweite und die Breite des ersten Rechteckes als Strukturbreite bezeichnet. Bei dieser Vorgehensweise wird eine Art

Treppenstruktur erzeugt, welche es ermöglicht den Winkel variabel einstellen zu können. Durch die Materialzusammensetzung der zu bearbeitenden Platte ist damit zu rechnen, dass die Flanken der Struktur verlaufen (geradlinig werden) und dadurch eine V-förmige Nut entsteht. Durch Variation der Strukturbreite und der Schrittweite wird es möglich sein V-förmige Nuten mit variablen Winkeln herzustellen. Abbildung 12 verdeutlicht diesen Zusammenhang.



Abbildung 12: Treppenstruktur mit unterschiedlicher Schrittweite

Sind dafür geeignete Parameter gefunden, müssen mehrere Bahnen nebeneinander hergestellt werden. Damit zwei Platten ineinandergreifen können, und nicht mit den Spitzen aufeinanderliegen, sind diese entweder unterschiedlich zu bearbeiten oder die Struktur muss auf der einen Seite mit einem „Berg“ beginnen und auf der anderen mit einem „Tal“ enden, wie in Abbildung 13 dargestellt.

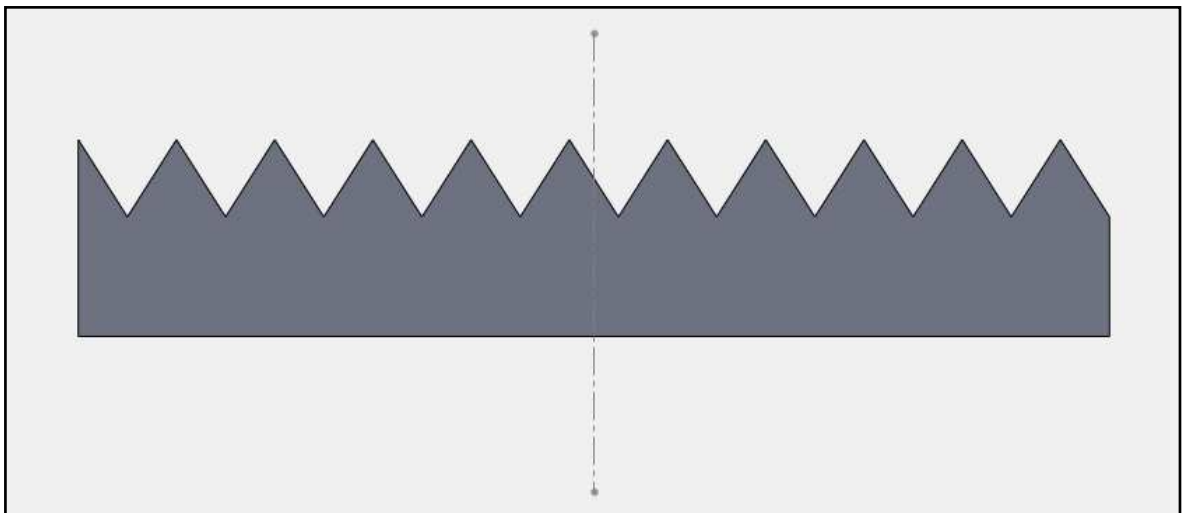


Abbildung 13: Darstellung der Strukturaufteilung

Aus diesem Grund muss auf die Platte eine ganzzahlige Anzahl von Nuten und eine halbe Nut aufgebracht werden. Sind dafür geeignete Werte gefunden, können diese, für die gesamte Platte, in die Material-Bearbeitungs-Software eingegeben und die komplette Platte bearbeitet werden.

Gitterstruktur:

Für die Herstellung der Gitterstrukturen werden als erstes die Parameter bestimmt, welche für einen Tiefenabtrag von 30, 80, 130 und 180 μm erforderlich sind. Ist dies geschehen werden mehrere einzelne Linien gelasert und der Abstand dieser variiert, um die kleinstmöglichen Strukturgrößen herstellen zu können. Anschließend wird eine Gitterstruktur erzeugt, wobei neben den Abständen in x- und y-Richtung auch die Delayeinstellungen von Bedeutung sind. Für die Bearbeitung spielen dabei das Gitter-Delay das On- und Off-Delay sowie das Jump- und Mark-Delay eine entscheidende Rolle. Das Gitter-Delay bezeichnet dabei den Abstand der Zwischenlinien von den Längslinien. In Abbildung 14 ist eine Prinzipskizze dargestellt.

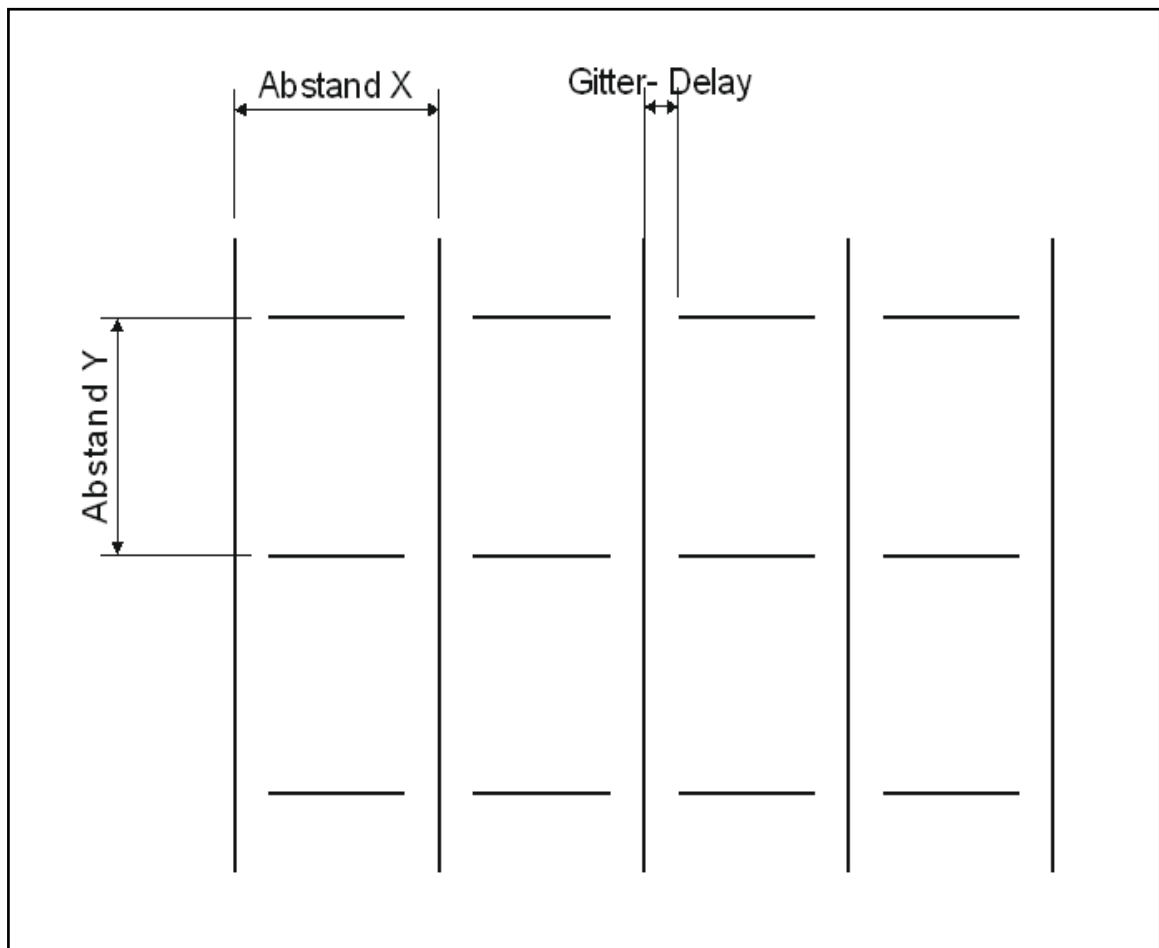


Abbildung 14: Prinzipskizze zur Erzeugung der Gitterstruktur

Vorversuche zeigten, dass Wartezeiten zwischen der Bearbeitung der einzelnen Linien ebenfalls einen Einfluss auf die Qualität der Gitterstruktur aufweisen. Das Gitter-Delay ist

notwendig, um die durch die Längslinien erzeugten Gräben nicht nochmals zu bearbeiten und muss in der Material-Bearbeitungs-Software mit programmiert werden. Es spielt jedoch für die eigentliche Bearbeitung eine untergeordnete Rolle, da die Ein- und Ausschaltpunkte des Lasers, und somit die Länge der Zwischenlinien, über die On- und Off-Delays eingestellt werden.

Um eine gleichmäßige Bearbeitung durch den Laser garantieren zu können darf der Laser erst dann eingeschalten werden, wenn die Spiegel die programmierte Vorschubgeschwindigkeit erreicht haben. Aus diesem Grund muss ein Laser On-Delay eingefügt werden, so dass der Laser erst nach der Beschleunigungsphase der Scannerspiegel eingeschaltet wird.

Durch mechanische Trägheit benötigen die Spiegel einige Zeit, um die endgültige Position zu erreichen. Damit der Laser erst abgeschaltet wird, wenn die Spiegel ihre Endposition erreicht haben, wird ein Laser Off-Delay eingefügt.

Um nach einem Positionierbefehl (Jump) mit ausgeschaltetem Laser die Einschwingvorgänge der Spiegel abzuwarten, wird ein Jump-Delay eingefügt. Das Mark-Delay dient dazu, die Schwingungen der Spiegel nach der Bearbeitung abzuwarten, bevor ein neuer Befehl ausgeführt wird. Sind das Jump-Delay oder das Mark-Delay zu lang eingestellt, zeigen sich keine sichtbaren Effekte, jedoch verlängert sich der Bearbeitungsprozess.

Um die nötigen Delayeinstellungen vorzunehmen sind in den folgenden Versuchen als erstes nur die Zwischenlinien zu bearbeiten. Das Jump- und Mark-Delay wird anschließend so eingestellt, dass sich einzelne Linien ergeben. Die Längslinien werden im Anschluss versetzt bearbeitet und On- und Off-Delay so variiert, dass sie mittig zu den Zwischenlinien liegen. Danach wird ein Gitter erzeugt und gegebenenfalls die Länge der Zwischenlinien verändert.

Punktstruktur:

Um die Punktstruktur herzustellen werden einzelne Punkte im Abstand von 200 μm in die Material-Bearbeitungs-Software eingegeben. Danach sind die Einstellungen für das Mark- und Jump-Delay zu überprüfen, so dass die Bearbeitung auch Punkte ergibt. Anschließend müssen die Parameter Laserleistung, Beschriftungszeit und Anzahl der Beschriftungen untersucht werden. Ziel dieser Untersuchungen ist ein Tiefenabtrag von ca. 80 μm .

4.3 Widerstandsmessung

Um die Auswirkungen der Strukturierung, auf die Kontaktwiderstände, ermitteln zu können werden die strukturierten Bipolarhalbplatten vom ZBT in Duisburg vermessen.

Die Messapparatur zur Vermessung der Bipolarplatten wurde am ZBT-Duisburg speziell entwickelt (Abbildung 15).

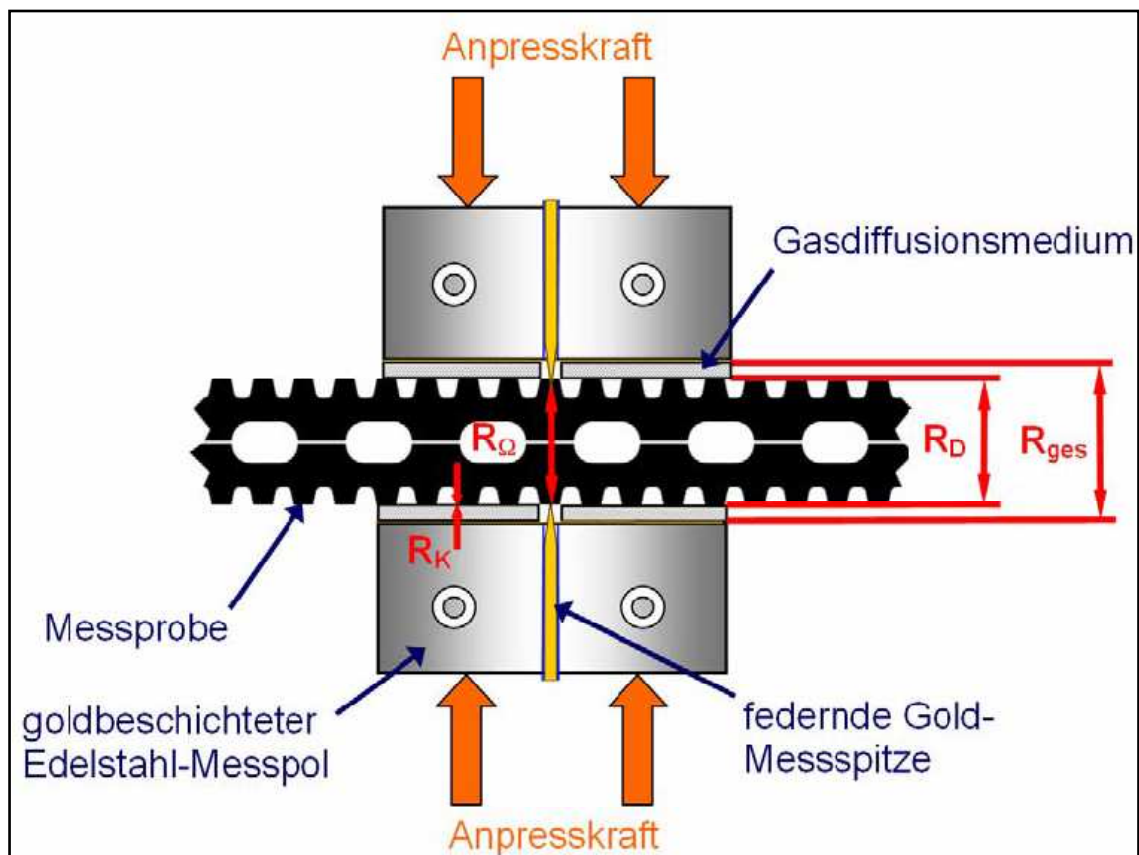


Abbildung 15: Darstellung der Vierpol- Widerstandsmessapparatur

Zwei Bipolarplatten werden, wie in Abbildung 15 dargestellt, zwischen die Messpole eingelegt. Zwischen den Vorderseiten und den Messpolen befinden sich noch Gasdiffusionslagen. Nach Aufbringung des Probenanpressdruckes von 20 bar wird bei vorgegebenen Steuerstrom die dafür notwendige Spannung ermittelt. Aus diesen Werten kann der Gesamtwiderstand R_{ges} bestimmt werden. Der Gesamtwiderstand setzt sich zusammen aus den Innenwiderständen der beiden Gasdiffusionsmedien, der beiden Bipolarplatten und der Kontaktwiderstände zwischen GDL und Platte bzw. dem Kontaktwiderstand zwischen den beiden Platten. Mit Kenntnis der Widerstände der GDL können diese vom Gesamtwiderstand abgezogen werden und es ergibt sich der Durchgangswiderstand R_D der Probe. Die federnd gelagerten Gold- Messspitzen drücken in die Oberflächen der Bipolarplatten. Dadurch wird der Kontaktübergangswiderstand überwunden und somit der Bulkwiderstand $R_Ω$ bestimmt. Der Bulkwiderstand setzt sich also aus den Innenwiderständen der Bipolarplatten und dem Kontaktwiderstand zwischen ihnen zusammen. Anschließend kann über die Formel

$$R_K = \frac{1}{2} \cdot (R_D - R_Ω) \quad (14)$$

der Kontaktwiderstand zwischen GDL und dem Flow Field berechnet werden [KRE 08].

5 Versuchsdurchführung

5.1 ACI- Beschriftungslaser

5.1.1 Versuchsaufbau

Für die Markierung der Bipolarplatten wird in der Anlage am ZBT-Duisburg ein diodengepumpter, aktiv gütegeschalteter Nd:YAG-Laser verwendet. Dieser wird von der Firma ACI hergestellt, und hat die Bezeichnung DPL Fortis Marker. Um sowohl die Markierung als auch die Strukturen mit einem Lasersystem zu erzeugen werden die ersten Versuche mit diesem Laser durchgeführt. Die technischen Daten sind in Tabelle 4 dargestellt.

Bezeichnung	DPL Fortis Marker
Wellenlänge [nm]	1064
max. mittlere Leistung [W]	18
Strahlqualität	$M^2 < 1,8$
Pulsfolgefrequenz [kHz]	1 – 100
Pulsdauer [µs]	0,1 - 1000 (system- und frequenzabhängig)
Brennweite F-Theta Optik [mm]	163
Spotdurchmesser [µm]	35

Tabelle 4: Technische Daten DPL Fortis Marker

Die Ablenkung des Laserstrahls in x- und y-Richtung erfolgt über eine integrierte Galvo-Scanner-Einheit. Für die Positionierung des Werkstückes in z-Richtung wird ein Hubtisch verwendet, und dieser unter die Scanneinheit angebracht. Um das Austreten der Strahlung in das Umfeld zu verhindern, wurde der Laser auf ein Gestell montiert, welches sich in einem Gehäuse befindet. In diesem Gehäuse war eine Absaugung vorgesehen, um die anfallenden Partikel und den Laserrauch zu entfernen. Zur Steuerung des Lasersystems steht die Bediensoftware Magic Mark von ACI zur Verfügung. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 16 schematisch dargestellt.

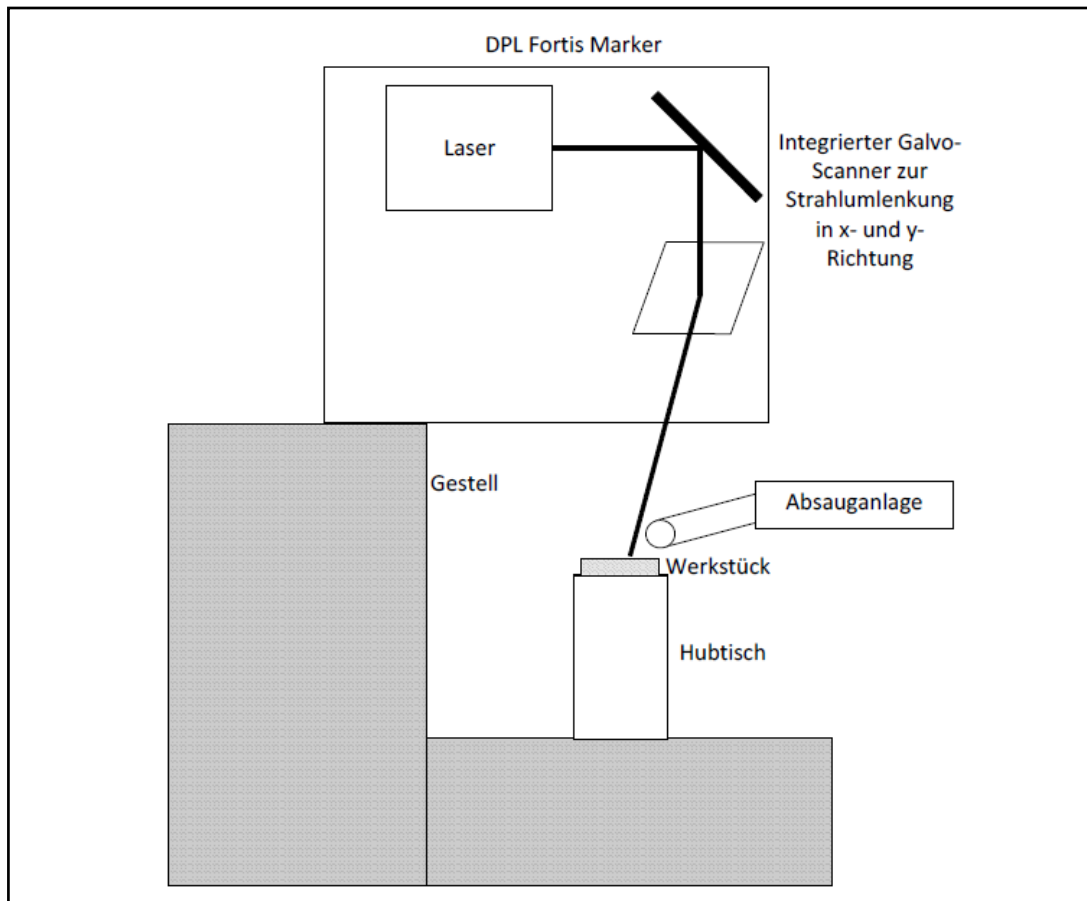


Abbildung 16: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus [REI13]

5.1.2 Durchführung

Als erstes war die Leistungskurve des verwendeten Lasersystems aufzunehmen. Dabei wurde die Laserleistung auf 30 % eingestellt, die Pulsdauer konstant gehalten, und die Repetitionsrate von 0,5 kHz bis 100 kHz schrittweise variiert. Die Pulslänge wurde auf das Minimum von 100 ns eingestellt, da für kürzere Pulse eine Verringerung der Rauheit und damit eine bessere Oberflächenqualität zu erwarten ist [SCH07]. Diese Messungen wurden dann wiederholt und die Laserleistung in 10 % Schritten erhöht. Die Messungen zeigten jeweils ein Maximum der mittleren Leistung bei einer Repetitionsrate von 10 kHz. Das Diagramm für 100 % Laserleistung ist in Anlage 1 hinterlegt.

Da die Angabe des Fokusabstandes von der Unterkante der Scaneinheit bis zur Werkstückoberfläche mit 220 ± 3 mm sehr grob angegeben wurde musste dieser kontrolliert werden. Um das zu erreichen sind einzelne Laserpulse bei verschiedenen Arbeitsabständen auf ein Material erzeugt und die Durchmesser vermessen worden. Um diese einzelnen Pulse herzustellen wurde eine Linie abgefahren und die Vorschubgeschwindigkeit so gewählt, dass kein Pulsüberlapp auftrat. Die benötigte Vorschubgeschwindigkeit kann über Formel (13) berechnet werden. Für eine Repetitionsrate von 10 kHz, einen angegebenen Fokusdurchmesser von 35 μm und einem Pulsüberlapp von 0 % ergab sich somit eine Vorschubgeschwindigkeit von 0,35 m/s. Die Linien sind auf einer beschichteten Glasplatte erzeugt worden, da auf diesem Material die Durchmesser besser sichtbar war-

en. Die Arbeitsabstände wurden um ± 3 mm in 0,5 mm Schritten variiert und die Durchmesser gemessen. Anschließend wurden die Werte in ein Diagramm übertragen und eine Trendlinie erstellt. Es zeigte sich, dass der Fokus bei einem Abstand von 219 mm von der Unterkante des Scanners zu finden ist.

Danach wurde die Ablationsschwelle ermittelt. Um einen Materialabtrag mit dem eingesetzten Laser zu erzeugen, ist es notwendig, eine materialspezifische Schwellenenergie-dichte (Schwellfluenz) zu überschreiten. Diese Ablationsschwelle (Abhängig von Wellenlänge und Pulsdauer) kann experimentell über Bestimmung des Schädigungsdurchmessers in Abhängigkeit der eingestrahnten Pulsenergie ermittelt werden. Um diese Schwelle zu ermitteln wurden einzelne Laserpulse auf dem Material erzeugt. Das konnte wiederum dadurch erreicht werden, dass die Vorschubgeschwindigkeit so gewählt wurde, dass es zu keinem Pulsüberlapp kam. Im Anschluss wurde die Laserleistung von 30 % in 10 % Schritten erhöht und jeweils 2 Bahnen mit dem Laser bearbeitet. Pro Bahn wurden je 4 Durchmesser der Einzelpulsablationen vermessen, der Mittelwert quadriert und gegen die logarithmierten Pulsenergien aufgetragen. Aus Gleichung (12) ergab sich aus dem Anstieg der Geraden der Strahlradius ω_0 wie folgt:

$$\text{Anstieg} = 2 \cdot \omega_0^2 \quad (15)$$

Aus der Leistungsaufnahme konnten die Pulsenergien mittels Gleichung (12) berechnet werden und mit Gleichung (11) die dazugehörigen Spitzenfluenzen. Nach Gleichung (10) wurden anschließend die quadrierten Durchmesser gegen die logarithmierten Spitzenfluenzen aufgetragen und eine Trendlinie erstellt (Abbildung 17). Die Schwellfluenz entspricht dabei der Extrapolation dieser Werte für $d \rightarrow 0$.

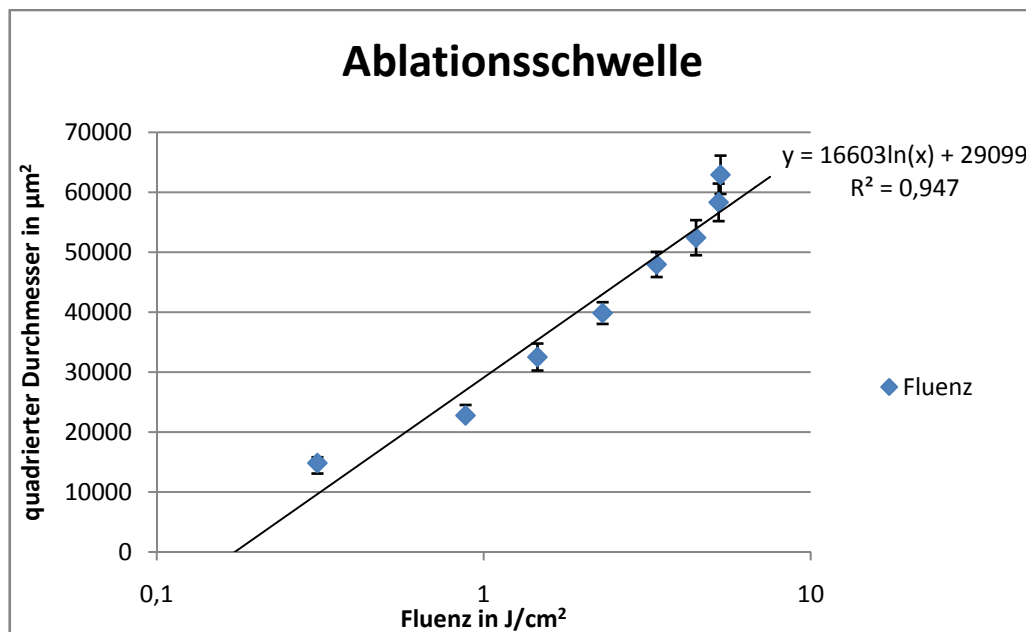


Abbildung 17: Ablationsschwelle für Graphit-Polypropylen

Mit der Funktionsgleichung der Trendlinie berechnet sich die Schwellfluenz daher zu $F_s = 0,17 \text{ J/cm}^2$. Der Wert für die Ablationsschwelle kann jedoch nur als grobe Näherung angesehen werden, da das Strahlprofil des eingesetzten Lasers kein Gaußprofil darstellt. Ebenfalls sind die Durchmesser der Einzelpulsablationen nicht sauber erkennbar (Abbildung 18). Dies ist auf Inhomogenitäten im Werkstoff zurückzuführen.



Abbildung 18: Ablatierte Zone von Graphit-Polypropylen bei $F_0 = 3,38 \text{ J/cm}^2$

Aus dem Anstieg der Trendlinie und den gemessenen Durchmessern ist ersichtlich, dass der angegebene Spotdurchmesser von $35 \mu\text{m}$ nicht mit dem tatsächlichen übereinstimmt. Der über den Anstieg mit Gleichung 14 berechnete Spotdurchmesser ergab sich zu $182 \mu\text{m}$.

Um einen Flächenabtrag zu erreichen müssen mehrere parallele Bahnen abgetragen werden. Daher wurde in der Beschriftungssoftware ein Rechteck von $2 \times 2 \text{ mm}$ programmiert und dieses Rechteck durch Linien gefüllt. Die Pulswiederholfrequenz betrug dabei 10 kHz , da für diese Frequenz die Leistung jeweils ein Maximum zeigte. Die Pulslänge und die Laserleistung wurden anfänglich auf das Minimum eingestellt ($\tau_p = 100 \text{ ns}$, $P_L = 30 \% \pm 0,36 \text{ W}$). Um den Parameter des Puls- und Spurüberlapps untersuchen zu können sind beide Werte zuerst auf 0% eingestellt worden. Aus Gleichung (13) ergab sich somit die Vorschubgeschwindigkeit zu $1,82 \text{ m/s}$ und der Linienabstand betrug $182 \mu\text{m}$. Bei diesen Einstellungen war kaum ein Tiefenabtrag erkennbar, weshalb die Anzahl der Überfahrten erhöht wurde. Bei 100 Überfahrten zeigte sich ein messbarer Tiefenabtrag. Nun wurde die Laserleistung in 10% Schritten erhöht, um den Tiefenabtrag bestimmen zu können. Bei 100% Laserleistung war der Abtrag am höchsten und keine Aufwürfe an den Rändern zu erkennen, weshalb in den folgenden Versuchen die maximale Leistung verwendet wurde. Der Tiefenabtrag ist jedoch nicht nur von der Leistung abhängig, sondern ebenfalls vom eingestellten Puls- und Spurüberlapp. Daher ist mit 100% Leistung der Puls- und Spurüberlapp in 5% Schritten erhöht worden. Bei diesen Versuchen ergab sich, dass die Oberfläche nach dem Abtrag große Unregelmäßigkeiten auf-

wies, und die Variation des Puls- und Spurüberlapps kaum Auswirkungen zeigte. Dies lässt eine schlechte Puls-zu-Puls-Stabilität vermuten, so dass einzelne Pulse unterdrückt werden. Aus diesem Grund wurden einzelne Bahnen erstellt und die Abstände der Einzelpulsablationen gemessen. Dabei zeigte sich, dass die eingestellte Repetitionsrate nicht mit den tatsächlichen Ergebnissen übereinstimmte. Abhängig von eingestellter Laserleistung, Repetitionsrate und Pulslänge wurden einzelne Pulse vom System ausgelassen. Aufgrund dieser schlechten Puls-zu-Puls-Stabilität war eine definierte Strukturierung mit diesem Lasersystem nicht möglich. In Abbildung 19 ist der Flächenabtrag mit einem eingestellten Puls- und Spurüberlapp von 50 % zu sehen.

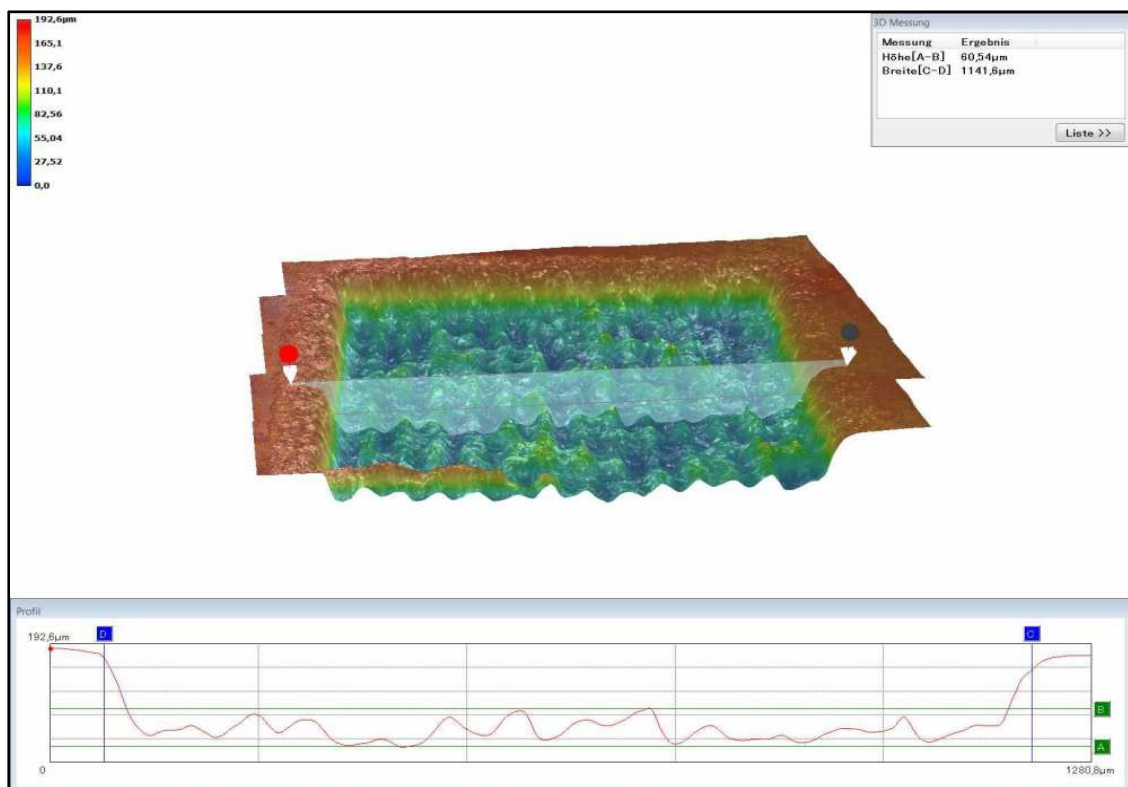


Abbildung 19: Flächenabtrag

5.1.3 Ergebnisse und Zusammenfassung

Bei den Untersuchungen zur Ablationsschwelle zeigte sich bereits, dass der angegebene Spotdurchmesser des Nd:YAG-Lasers nicht mit dem wirklichen Durchmesser übereinstimmt. Der mit Gleichung (14) berechnete Durchmesser betrug 182 µm, wodurch die minimal möglichen Strukturen größer werden. Jedoch war eine definierte Strukturierung mit dem Laser nicht möglich, da das System über eine sehr schlechte Puls-zu-Puls-Stabilität verfügte. Aus diesem Grund konnte kein idealer Puls- und Spurüberlapp gefunden werden, weshalb ein anderes Lasersystem für die Aufgabe ausgewählt werden musste.

5.2 Explorer XP

5.2.1 Versuchsaufbau

Aufgrund der schlechten Ergebnisse mit dem DPL Fortis Marker musste nach einem alternativen Lasersystem gesucht werden. In der Firma SITEC stand das Lasergerät Explorer XP von der Firma Newport zur Verfügung. Der Explorer XP ist ein diodengepumpter, aktiv gütegeschalteter Nd:YVO₄- Laser. Er ist frequenzverdoppelt und emittiert daher eine Wellenlänge von 532 nm, welche vom Graphit besser absorbiert wird [YNA13]. Ebenfalls verfügt dieser Laser über eine hohe Puls-zu-Puls-Stabilität. Weitere technische Daten sind in Tabelle 5 zu sehen.

Bezeichnung	Explorer XP
Wellenlänge [nm]	532
max. mittlere Leistung [W]	5
Strahlqualität	$M^2 < 1,2$
Pulsfolgefrequenz [kHz]	40 – 300
Pulsdauer [ns]	7 – 24 (system- und frequenzabhängig)
Puls-zu-Puls-Stabilität [%]	ca. 1 (bei 60 kHz)

Tabelle 5: Technische Daten Explorer XP

Der Laser ist in einer CNC-Maschine integriert, die über ein Gehäuse mit Sicherheitssensoren und einem Laserschutzfenster verfügt. Die Achsen der CNC-Maschine sind mit Linearmotoren versehen und erlauben eine hohe Positioniergenauigkeit. In die Maschine ist ein Scanner der Firma Scanlab integriert. Der Scanner hat die Bezeichnung intelliSCAN 10, ein Bearbeitungsfeld von 75 x 75 mm bei einer Brennweite von 163 mm. Die Ansteuerung des Lasers erfolgt über die Software L-Win und die Ansteuerung des Scanners mit der Bearbeitungssoftware laserDESK. Abbildung 20 zeigt den Versuchsaufbau in der CNC- Maschine.

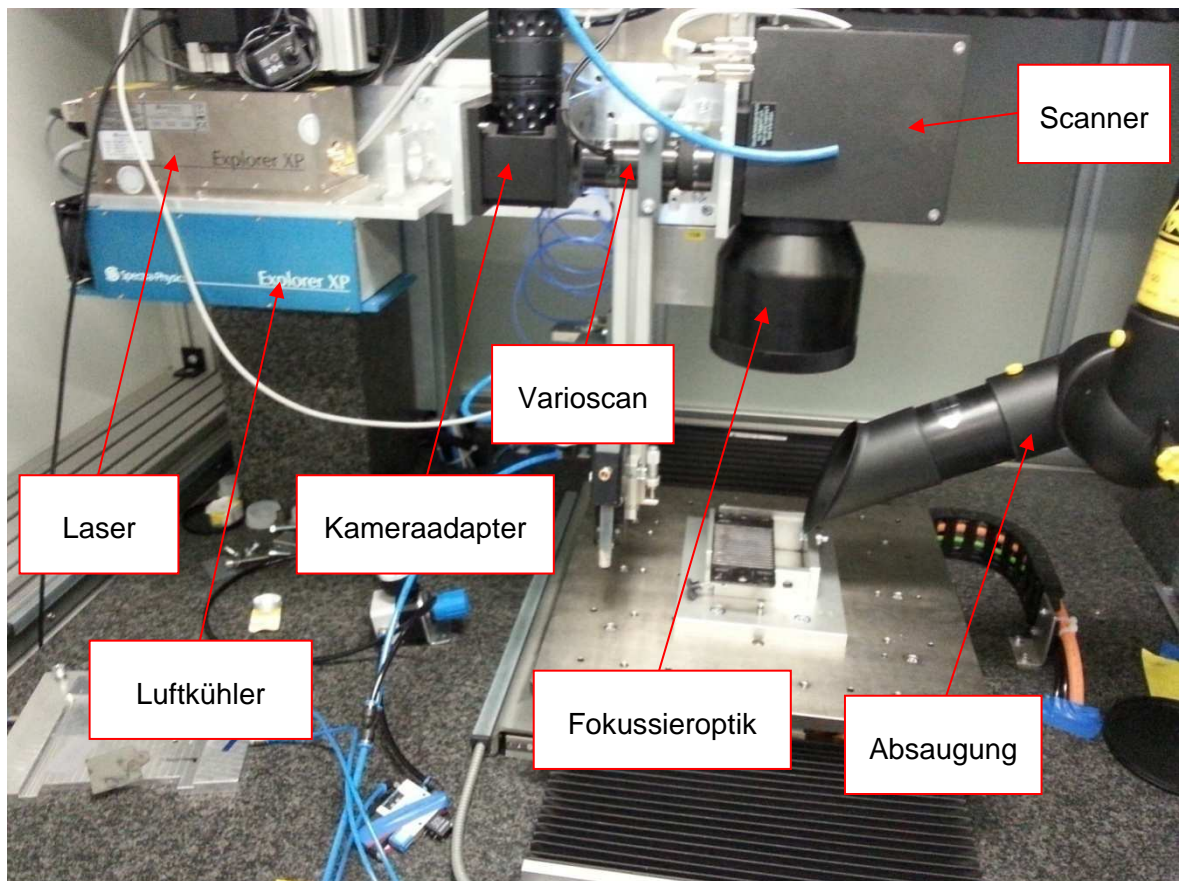


Abbildung 20: Versuchsaufbau des Lasersystems in der CNC-Maschine

Zusätzlich war für die Versuche ein Strahlaufweiter zwischen Laser und Kameraadapter eingebaut, der jedoch für die Durchführung anderer Versuche in der Firma demontiert wurde. Ebenso spielte der Kameraadapter für die folgenden Versuche keine Rolle.

5.2.2 Durchführung

Für dieses Lasersystem war keine Leistungskurve notwendig, da die Daten des verwendeten Lasers vor der Auslieferung kontrolliert und in Vorversuchen bestätigt wurden. Das Prüfprotokoll ist in Anlage 2 hinterlegt. Es zeigt ein Maximum der mittleren Leistung bei einer Repetitionsrate von 100 kHz. Im kontrollierten Bereich von 60 bis 300 kHz sind die Abweichungen der maximal mittleren Leistung jedoch gering. Die Pulsenergie zeigte ein Maximum bei einer Repetitionsrate von 60 kHz und einer Pulslänge von 5,7 ns, weshalb bei den folgenden Versuchen diese Werte eingestellt wurden.

Für die Fokussuche wurde wieder eine beschichtete Glasplatte verwendet und Linien mit einem Pulsüberlapp von 0 % erzeugt und die entstandenen Durchmesser vermessen. Die vermutete Fokusslage lag bei einer Einstellung der z-Achse von -102,05 mm. Da die Bearbeitungshöhe über die CNC-Maschine genauer eingestellt werden kann, sind die Arbeitsabstände um $\pm 500 \mu\text{m}$ in $100 \mu\text{m}$ Schritten variiert worden. Die entstandenen Durchmesser wurden über die Höheneinstellung aufgetragen und eine Trendlinie erstellt. Die Fokus-

lage ergab sich bei einer z-Achseinstellung von -101,96 mm. Der minimale Durchmesser betrug 24,80 μm , welcher als Fokusbereich angenommen wurde.

Auch bei diesem Lasersystem ist die Kenntnis der Ablationsschwelle sinnvoll. Diese Schwelle konnte jedoch für diesen Laser nicht bestimmt werden, da die einzelnen Pulse, aufgrund der geringen Leistung und Pulsenergie, auch bei 100 % Laserleistung sehr schlecht erkennbar waren.

Flächenabtrag:

Für einen flächigen Abtrag wurde in der Beschriftungssoftware anfangs ein Rechteck von 2 x 2 mm programmiert, und dieses mit Linien gefüllt. Die Laserleistung wurde auf das Minimum von 30 % eingestellt der Puls- und Spurüberlapp anfangs auf 0 % (Vorschubgeschwindigkeit 1,5 m/s, Bahnversatz 0,025 mm). Mit einer Überfahrt war kein Abtrag zu erkennen, weshalb die Anzahl der Überfahrten auf 100 gesteigert und die Laserleistung schrittweise auf 100 % erhöht wurde. Der größte Tiefenabtrag war bei 100 % Laserleistung erkennbar. Ebenfalls zeigten sich keine Aufwürfe an den Rändern der abgetragenen Fläche, weshalb in den folgenden Versuchen diese Laserleistung beibehalten wurde. Die Untersuchung der Parameter Pulsüberlapp und Bahnversatz erfolgte als nächstes. Der Pulsüberlapp und der Bahnversatz sind dabei auf identische Werte eingestellt worden. Sie wurden in 5 % Schritten von 0 bis 95 % variiert. Da der Tiefenabtrag bei 100 % Leistung bereits sehr groß war, konnte die Zahl der Überfahrten auf 20 verringert werden. Mit der Erhöhung des Puls- und Spurüberlapps stieg der Tiefenabtrag sowie die Bearbeitungszeit an. Die größte Abtragsrate (pro Zeiteinheit abgetragenes Volumen) ergab sich bei einem Puls- und Spurüberlapp von 70 %. Ebenfalls stieg die Rauheit der abgetragenen Oberfläche mit Erhöhung des Überlapps an. Bei diesen Parametereinstellungen zeigte sich eine große Abtragstiefe. Um diese Tiefe zu verringern wurde die Zahl der Überfahrten schrittweise reduziert, und es ergab sich ein Tiefenabtrag von ca. 30 μm pro Überfahrt. Für den angestrebten Tiefenabtrag von ca. 100 μm wurden daher 3 Überfahrten notwendig. Tabelle 6 zeigt die verwendeten Parameter für den Flächenabtrag.

Laserleistung [%]	100 (\pm 4828 mW)
Repetitionsrate [kHz]	60
Pulslänge [ns]	5,7
Puls- und Spurüberlapp [%]	70 (v = 4,5 m/s, Bahnversatz = 7,5 μm)
Anzahl der Überfahrten	3

Tabelle 6: Parameter für den Flächenabtrag

Durch die Verringerung der Überfahrten ergab sich ebenfalls eine Verringerung der Oberflächenrauheit. Diese zeigte dennoch eine hohe Rauheit mit einem Wert, für die gemittel-

te Rautiefe, von $R_z = 30,9 \mu\text{m}$. Im Vergleich dazu ergaben sich bei der gefrästen Platte Rauheitswerte von $R_z = 7,8 \mu\text{m}$. Diese hohen Werte sind auf die Partikelgröße im Graphit-Polypropylen zurückzuführen. Da bei der Laserbearbeitung ganze Graphitpartikel herausgeschlagen werden und die mittlere Partikelgröße (D50-Wert) bei ca. $20 \mu\text{m}$ liegt sind somit geringere Rauheitswerte nicht möglich.

Für die Entfernung der Erhebungen wurde eine DXF-Datei (vom ZBT-Duisburg) in die Beschriftungssoftware importiert und die einzelnen Erhebungen mit den Parametern programmiert. Da das Scanfeld des verwendeten Scanners nicht groß genug für die gesamte Platte war, musste die Bearbeitung für die linke und rechte Seite einzeln erfolgen. Abbildung 21 zeigt die Benutzeroberfläche der verwendeten Beschriftungssoftware mit den zu entfernenden Erhebungen für die linke Seite der Bipolarplatte.

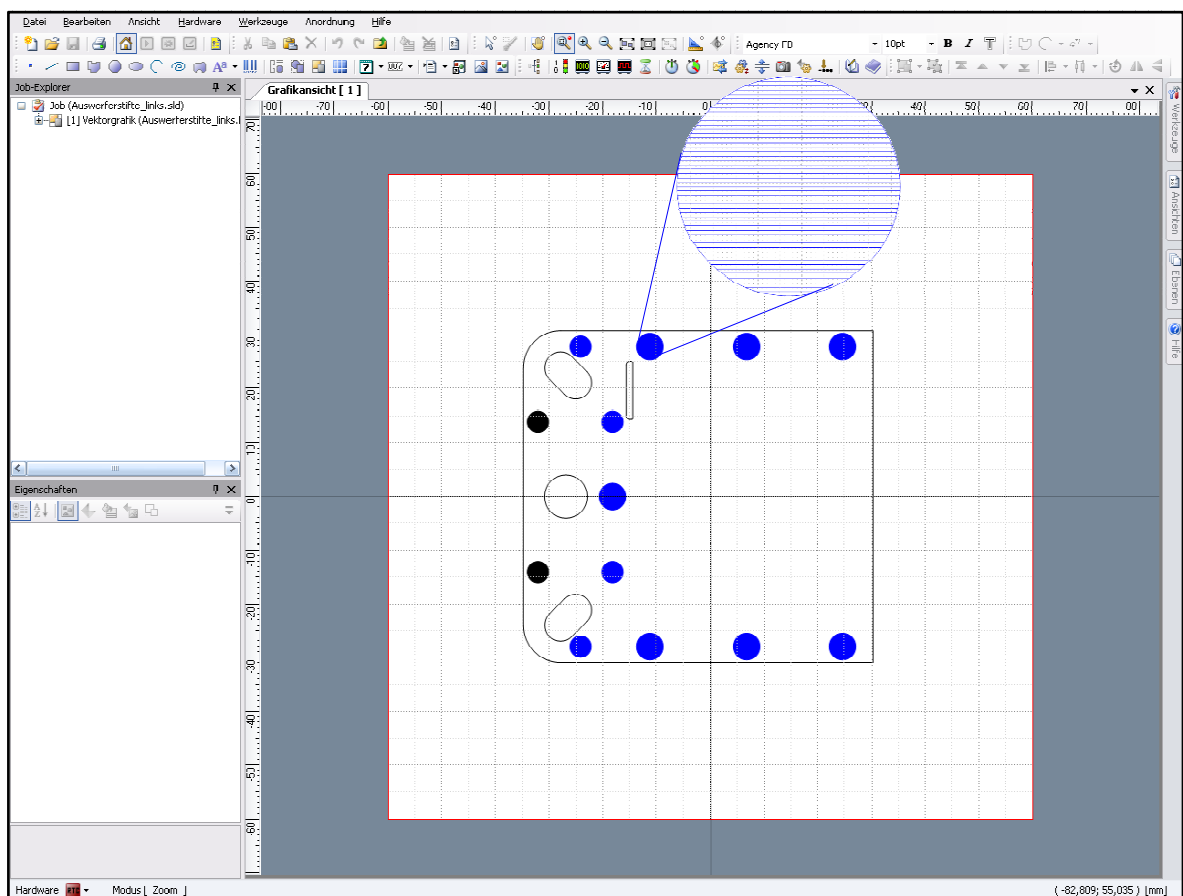


Abbildung 21: Screenshot der Beschriftungssoftware laserDESK

Da die Erhebungen unterschiedliche Höhen aufwiesen, musste die Anzahl der Überfahrten den jeweiligen Höhen angepasst werden. Deshalb wurde an 3 unterschiedlichen Platten die Höhe jeder Erhebung vermessen und der Mittelwert bestimmt. Mit der Kenntnis der Abtragshöhe pro Überfahrt konnte somit die Anzahl der Überfahrten für jede Erhebung bestimmt werden. Beim Abtrag der Erhebungen zeigte sich jedoch, dass die Ausrichtung und Positionierung der Platte sehr schwierig war. Aufgrund der Positionierung mittels Anschlag, einem Grat an den Seiten der Platten und einem Grat an den Erhebun-

gen konnte die Platte nicht genau ausgerichtet werden. Beim Abtrag entstand deshalb ein größerer Tiefenabtrag (Graben) auf einer Seite der Erhebung und es blieb ein Steg auf der anderen Seite stehen wie in Abbildung 22 dargestellt.

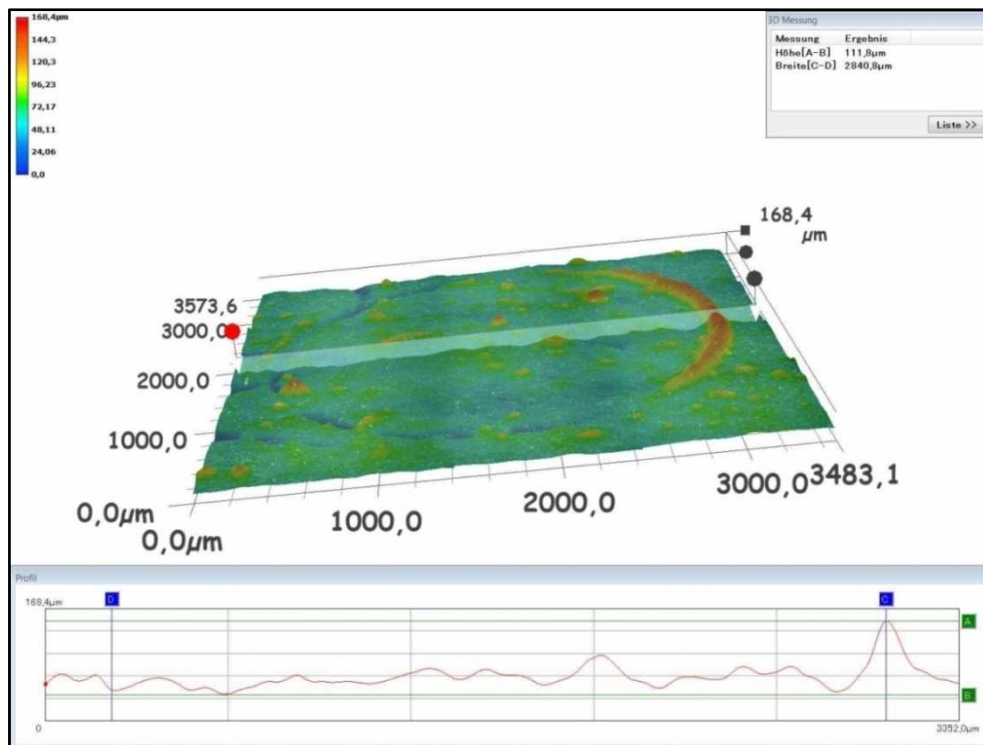


Abbildung 22: Abtrag einer Erhebung der Auswerferstifte

Nach Absprache mit dem ZBT-Duisburg fiel die Entscheidung die Erhebungen großflächiger abzutragen, so dass ein durchgängiger Graben entstand, und die Erhebung komplett abgetragen wurde. Die Programmierung der abzutragenden Fläche im Flow Field Bereich erfolgte analog in der Beschriftungssoftware.

Linienstruktur:

Um eine Linienstruktur mit V-förmigen Querschnitt zu erzeugen, wurden die Parameter des Flächenabtrages verwendet. Für die Erzeugung der V-Nut mit variablem Winkel war ein Rechteck mit einem Flächenabtrag zu programmieren. Die Programmierung eines weiteren Rechtecks mit geringerer Breite führte somit zu einer Treppenstruktur. Die Strukturbreite wurde im Anschluss schrittweise um 8 μm vergrößert. Die Schrittweite betrug bei diesen Versuchen jeweils 8 μm. Ab einer Strukturbreite von 48 μm ergaben sich V-förmige Nuten. Die Winkel dieser Nuten waren jedoch zu klein, so dass die Schrittweite vergrößert werden musste. Bei einer Schrittweite von 32 μm ergab sich in etwa der gewünschte Winkel von 65°, jedoch war die Struktur sehr unregelmäßig. Aus diesem Grund wurde die Struktur vergrößert. Bei einer Strukturbreite von 96 μm und einer Schrittweite von 32 μm ergab sich eine V-Nut mit einem Winkel von ca. 65°, wie in Abbildung 23 zu sehen.

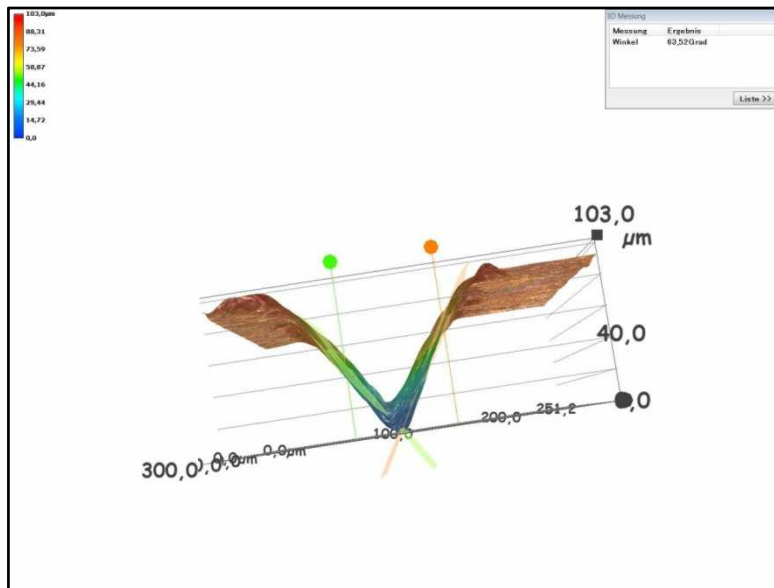


Abbildung 23: V- Nut mit Winkel ca. 65°

Mit diesen Parametern konnten anschließend mehrere Bahnen nebeneinander erzeugt werden. Um das Verhältnis zwischen Nutbreite und Plattenbreite zu erreichen (siehe Abbildung 13) wurde die Plattenbreite (61,85 mm) durch die mögliche Anzahl der Nuten geteilt. In der Beschriftungssoftware können nur ganzzahlige Mikrometerbeträge eingestellt werden, so dass sich feste Abstände der Nuten zueinander ergaben. Da die Breite einer Nut ca. 125 μm betrug, wurden die Abstände zwischen den Nuten mit 132 μm programmiert ($\approx 468,5$ Nuten). Abbildung 24 zeigt das Ergebnis von 6 nebeneinander erzeugten Bahnen.

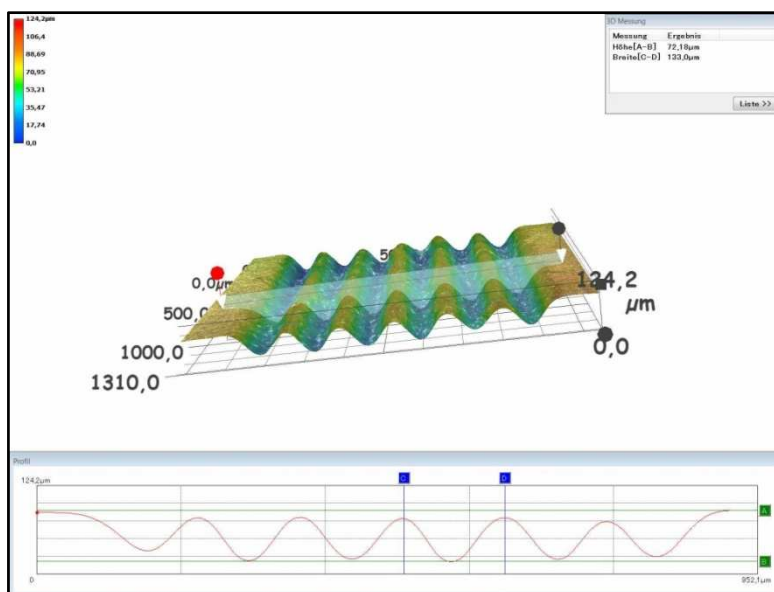


Abbildung 24: mehrere Bahnen mit Winkel 65°

Die Parameter für die Herstellung der Linienstruktur sind in Tabelle 7 dargestellt.

Winkel [°]	65
Laserleistung [%]	100
Betriebsmodus	gepulst
Repetitionsrate [kHz]	60
Pulslänge [ns]	5,7
Puls- und Spurüberlapp [%]	70
Anzahl der Überfahrten	3
Strukturbreite [µm]	96
Schrittweite [µm]	32

Tabelle 7: Parameter für die Erzeugung der V-Nut

Für eine Widerstandsmessung konnten somit erste Platten bearbeitet werden, wobei die Gitterstruktur noch nicht aufgebracht wurde. Es erfolgte die Bearbeitung von vier Platten, mittels flächigem Abtrag der Erhebungen der Auswerferstifte, sowie des Flow Field Bereiches. Auf der Rückseite der Platte wurde die Linienstruktur erzeugt und bei zwei Platten vor der Bearbeitung der Linienstruktur die Rückseite komplett flächig bearbeitet. Die Vermessung der Platten erfolgte am ZBT-Duisburg. Bei der Bearbeitung der Platten zeigte sich jedoch, dass die Bearbeitungszeit sehr hoch und deshalb sehr unwirtschaftlich ist. Aus diesem Grund wurden parallel Versuche mit einem weiteren Laser unternommen.

5.2.3 Ergebnisse und Zusammenfassung

Die Vermessungen der ersten Platten am ZBT-Duisburg ergaben eine Erhöhung sowohl der Kontaktwiderstände als auch der Bulkwiderstände (siehe Kapitel 4.3). Dabei zeigte sich, dass der Bulkwiderstand bei der Probe ohne flächigen Abtrag geringer war. Dies begründet sich durch die Tatsache, dass bei einem vorhergehenden Flächenabtrag die Oberfläche bereits eine erhöhte Rauheit aufweist. Die nach dem Flächenabtrag erzeugten Linienstrukturen weisen große Unregelmäßigkeiten auf, wodurch eine Verzahnung und dadurch eine Vergrößerung der Kontaktfläche nicht zustande kommt. Aus diesem Grund wurde in den folgenden Versuchen darauf verzichtet, die Rückseite vor der Erzeugung der Linienstruktur flächig abzutragen. Der erhöhte Kontaktwiderstand zwischen Bipolarplatte und GDL weist darauf hin, dass der Flächenabtrag mit dem verwendeten Lasersystem erneut eine schlecht leitende Schicht in das Material eingebracht hat. Dieser Effekt könnte

sich durch die Erzeugung der Gitterstruktur und der damit verbundenen Vergrößerung der Kontaktfläche jedoch verringern. Aufgrund der geringen mittleren Leistung, des kleinen Fokussdurchmessers und der damit verbundenen sehr hohen Bearbeitungszeit, von über 2,5 Stunden pro Platte, musste jedoch aus wirtschaftlichen Gründen ein weiteres Lasersystem zur Bearbeitung der gestellten Aufgabe herangezogen werden.

5.3 Faserlaser IPG – YLR

5.3.1 Versuchsaufbau

Da auch der Explorer XP für die gestellten Aufgaben keine zufriedenstellenden Ergebnisse lieferte wurde ein drittes Lasersystem verwendet. Zum Einsatz kam dabei ein Faserlaser der Firma IPG, mit einer höheren mittleren Leistung, um die Bearbeitungszeiten zu reduzieren. Es handelt sich dabei um einen Ytterbium-Faserlaser mit einer maximalen Ausgangsleistung von 200 W. Dieses System arbeitet im cw-Modus (Dauerstrichbetrieb), kann jedoch auch moduliert bei Frequenzen bis 50 kHz betrieben werden. In den folgenden Versuchen wird das System jedoch nur im cw-Modus eingestellt. Tabelle 8 zeigt die wichtigsten Daten.

Bezeichnung	YLR-200-AC-Y11
Wellenlänge [nm]	1070
Max. Ausgangsleistung [W]	200
Strahlqualität	$M^2 < 1,1$
Strahldurchmesser am Kollimator [mm]	4,5 - 5,5

Tabelle 8: Technische Daten des Faserlasers

Der Kollimator des Lasers ist für die Versuche auf einem optischen Tisch der Firma Newport aufgebracht. Über Umlenkspiegel wird der Laserstrahl in den Scanner intelliSCAN 30 der Firma Scanlab geleitet und auf die Bearbeitungsfläche fokussiert. Für die Positionierung der zu bearbeitenden Platten steht ein Hubtisch zur Verfügung, welcher auf zwei Linearachsen der Firma Thor Labs montiert wurde. Zur Entfernung von Ruß und anderen Partikeln war eine Absaugeinrichtung vorgesehen. Abbildung 25 zeigt den Versuchsaufbau auf dem optischen Tisch.

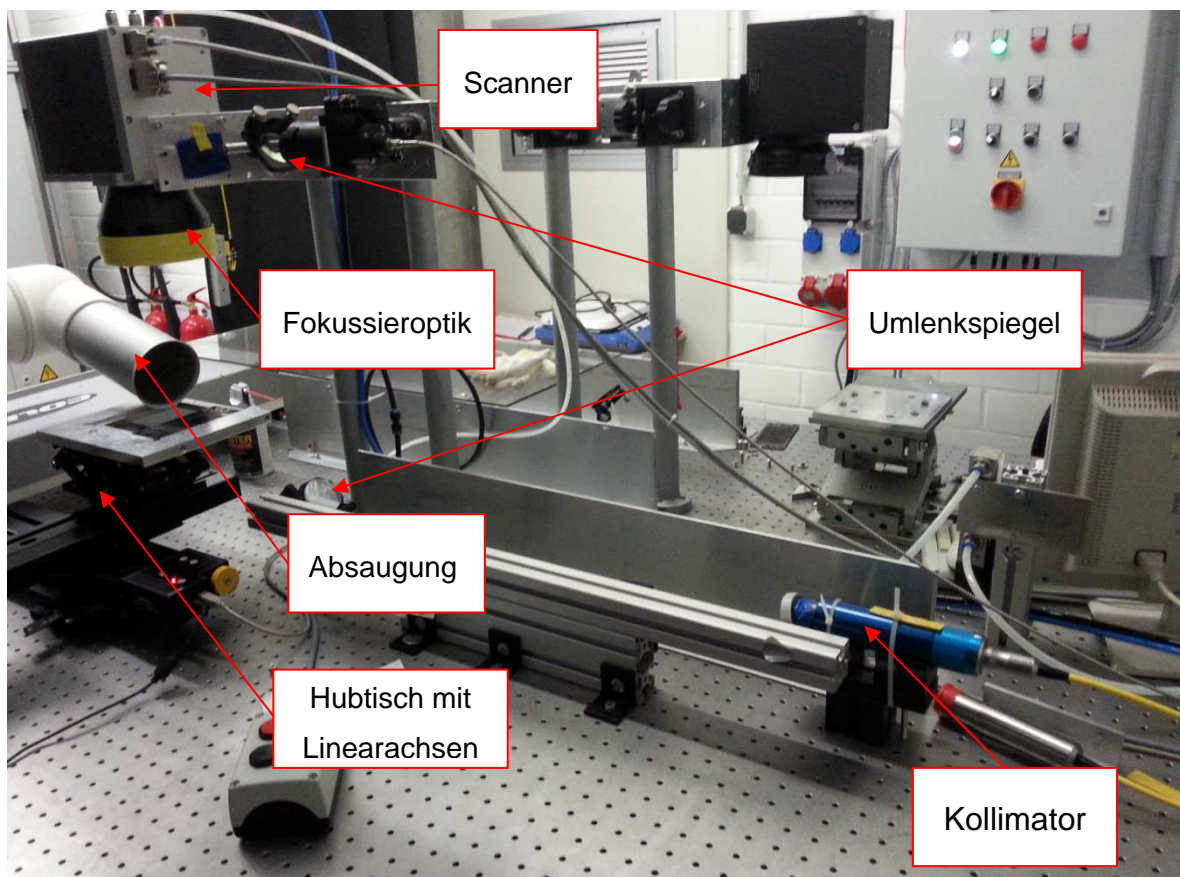


Abbildung 25: Versuchsaufbau des Lasersystems auf dem optischen Tisch

Um den verwendeten Scanner nicht zu beschädigen musste die Leistung des Lasers in der Bearbeitungssoftware auf 100 Watt heruntergeregelt werden.

5.3.2 Durchführung

Die Leistungskurve für dieses Lasersystem wurde bereits in Vorversuchen aufgenommen und ist in Anlage 3 hinterlegt. Die Fokuslage und der Fokusbereich waren ebenfalls bekannt. Der Fokusbereich beträgt 128,3 μm und liegt 122,5 mm von der Unterkante des Objektivs entfernt.

Flächenabtrag:

Da es bei Lasern im Dauerstrichbetrieb keinen unmittelbaren Zusammenhang zwischen Vorschubgeschwindigkeit und Spurüberlapp gibt, wurde der Einfluss der Laserleistung zuerst an einer einzelnen Linie untersucht. Dafür ist eine hohe Vorschubgeschwindigkeit von 2 m/s gewählt und die Leistung in 5 % Schritten bis zum Maximum erhöht worden. Der Tiefenabtrag stieg mit der Erhöhung der Leistung an, und der Abtrag zeigte auch bei 100 % Leistung keine Aufwürfe an den Rändern. Die erzeugten Nuten wiesen jedoch eine zu geringe Tiefe auf, weshalb die Vorschubgeschwindigkeit verringert werden musste. Bei einem Vorschub von 0,4 m/s stellte sich der erwünschte Tiefenabtrag von ca. 100 μm ein. Die Untersuchung des Parameters Spurüberlapp erfolgte im Anschluss. Deshalb wurde ein Rechteck 2 x 2 mm abgetragen, und ein Spurüberlapp von 0 % (130 μm Bahnversatz)

eingestellt. Dieser konnte nun schrittweise erhöht werden um den idealen Spurüberlapp zu bestimmen. Die Rauheitswerte zeigten ein Minimum bei einem Bahnversatz von 100 μm . Jedoch stieg der Tiefenabtrag durch die Erhöhung des Spurüberlapps an, weshalb die Vorschubgeschwindigkeit wiederum erhöht werden musste. Die besten Ergebnisse für den Flächenabtrag konnten mit einer Laserleistung von 100 %, einem Spurüberlapp von 100 μm und einer Vorschubgeschwindigkeit von 0,5 m/s erreicht werden. Die erzielten Rauheitswerte R_z liegen dabei im Bereich von ca. 30 μm . Die Parameter sind in Tabelle 9 dargestellt.

Laserleistung [%]	100
Betriebsmodus	cw (Dauerstrich)
Vorschubgeschwindigkeit [m/s]	0,5
Spurüberlapp (Füllabstand) [μm]	100

Tabelle 9: Parameter für den Flächenabtrag

Linienstruktur:

Zur Herstellung der V-Nut sind die Parameter des Flächenabtrages verwendet worden. Für den Spurüberlapp erfolgte jedoch eine Reduzierung auf 90 μm , da bei diesem Spurüberlapp das Verhältnis von Strukturbreite zu Plattenbreite besser aufging. Anfänglich wurde ein Rechteck mit 3 Linien im Abstand 90 μm (Strukturbreite = 180 μm) erzeugt, und darauf folgend eine einzelnen Linie in der Mitte bearbeitet. Dabei zeigte sich keine ausgeprägte V-Nut, so dass anschließend die Strukturbreite in 90 μm Schritten vergrößert werden musste. Die Schrittweite betrug bei den folgenden Versuchen ebenfalls 90 μm und eine einzelne Linie in der Mitte wurde nicht bearbeitet. Ab einer programmierten Strukturbreite von 270 μm zeigte sich eine V-förmige Nut. Jedoch war der erzeugte Winkel mit ca. 35° zu klein, so dass die Schrittweite vergrößert und auf 135 μm neu eingestellt wurde. Auch bei dieser Schrittweite zeigte sich ein zu kleiner Winkel. Daher musste der Wert auf 180 μm vergrößert werden. Bei dieser Schrittweite ergab sich zwar ein größerer Winkel, jedoch waren die einzelnen Bearbeitungsschritte erkennbar, wie in Abbildung 26 gezeigt.

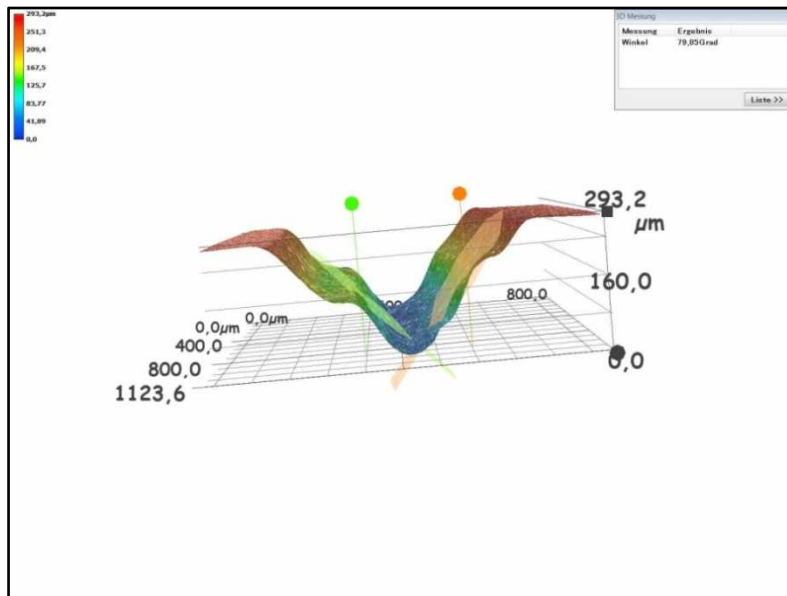


Abbildung 26: Nut bei 180 μm Schrittabstand

Aus diesem Grund war die Einstellung der Winkel mit Variation der Schrittweite nicht möglich. Die Schrittweite wurde wieder verkleinert, und der Abtrag pro Fläche reduziert. Eine Verringerung des Abtrages ist möglich durch die Reduzierung der Laserleistung oder die Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit. Um die Bearbeitung effizient und wirtschaftlicher zu gestalten, wurde in den nächsten Versuchen die Vorschubgeschwindigkeit nach Abtrag des ersten Rechteckes erhöht. Es erfolgte die Reduzierung der Schrittweite auf 90 μm und die Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit auf 1 m/s. Bei diesen Versuchen ergab sich eine V-Form mit einem Winkel von ca. 60° bei einer Strukturbreite von 540 μm , wie in Abbildung 27 zu sehen.

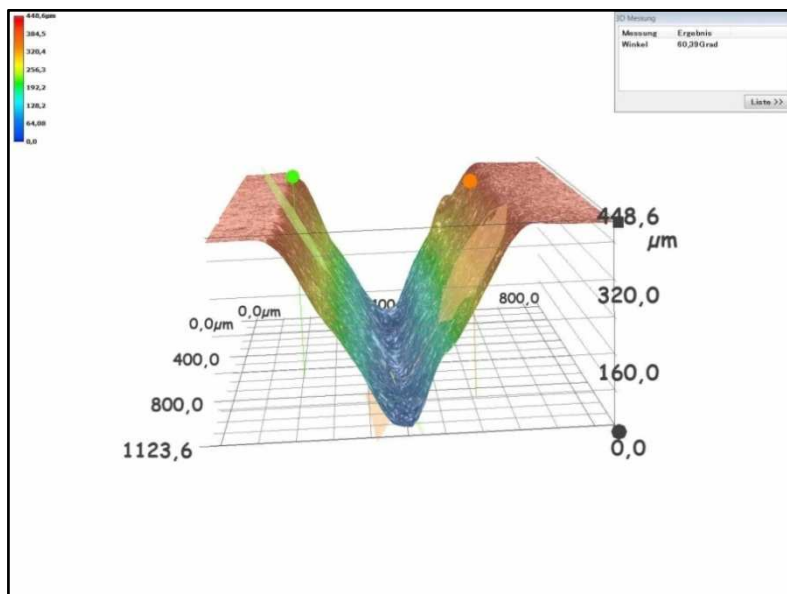


Abbildung 27: V-Nut mit einem Winkel von ca. 60°

Um Nuten mit Winkeln von 65° und 70° erzeugen zu können musste die Vorschubgeschwindigkeit geringfügig weiter erhöht werden. Bei gleichen Einstellungen wie für die 60° Nut jedoch einer Vorschubgeschwindigkeit von 1,1 m/s zeigte sich eine V-Nut mit einem Winkel von ca. 65° (Abbildung 28).

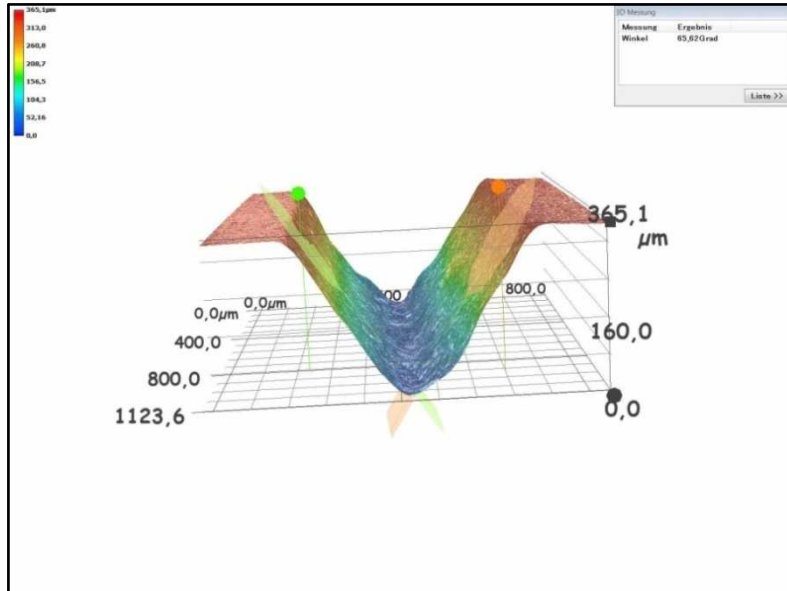


Abbildung 28: V-Nut mit einem Winkel von ca. 65°

Bei weiterer Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit für einen 70° Winkel zeigte sich jedoch, dass die Form der Nut eher einer U-Form entsprach. Zur Erreichung einer V-Nut wurde zusätzlich eine einzelne Linie in der Mitte der Struktur programmiert. Um den Abtrag sehr klein zu halten musste die Laserleistung verringert und die Vorschubgeschwindigkeit erhöht werden. Mit den Parametern Strukturbreite $540\ \mu\text{m}$, Schrittweite $90\ \mu\text{m}$, einer Vorschubgeschwindigkeit, nach dem ersten Abtrag, von 1,2 m/s und einer einzelnen Linie in der Mitte war eine V-Nut mit einem Winkel von 70° zu erkennen. Die Parameter für die einzelne Linie betrugen 20 % Laserleistung, 4 m/s Vorschubgeschwindigkeit und 100 Überfahrten. Die erzeugte Struktur ist in Abbildung 29 zu sehen.

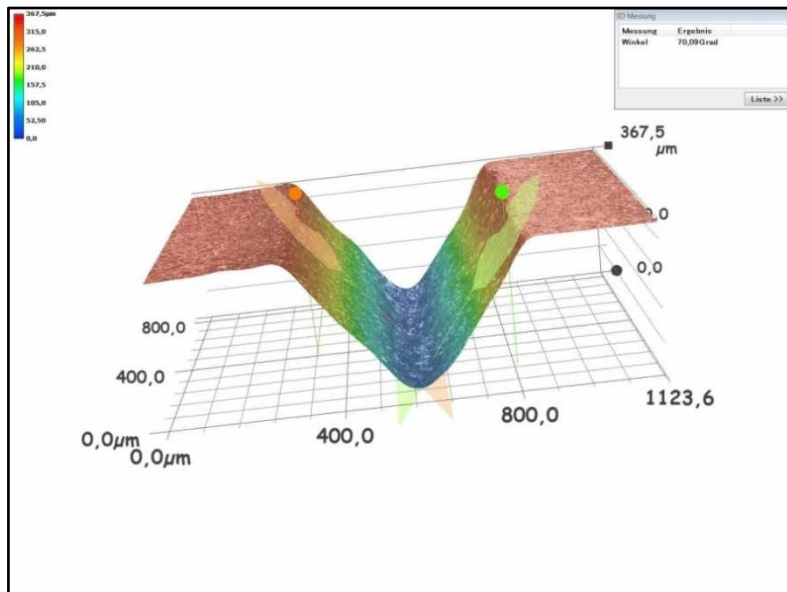


Abbildung 29: V-Nut mit einem Winkel von ca. 70°

Anschließend konnten mehrere Bahnen nebeneinander hergestellt werden. Die erzeugten Nuten wiesen alle eine Breite von ca. 550 µm auf. Um das Verhältnis von Plattenbreite zu Strukturbreite einzuhalten wurde der Abstand zwischen den Nuten auf 570 µm eingestellt ($\pm 108,5$ Nuten). Abbildung 30 zeigt 4 Bahnen mit einem Winkel von 65°.

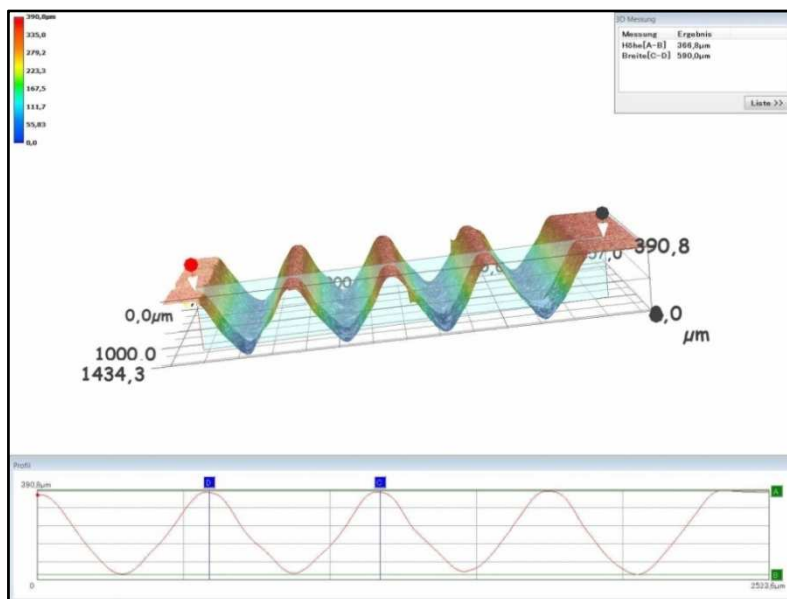


Abbildung 30: mehrere Bahnen mit Winkel 65°

In der Abbildung ist eine ausgeprägte Linienstruktur mit V-förmigem Querschnitt zu sehen. Im Anschluss wurden die Nuten über die gesamte Breite der Platte programmiert, so dass die oben erwähnt Aufteilung eingehalten wurde. In Tabelle 10 sind die Einstellungen für die Erzeugung der Linienstrukturen zusammengefasst.

Winkel [°]	60	65	70
Laserleistung [%]	100	100	100
Betriebsmodus	cw	cw	cw
Strukturbreite [µm]	540	540	540
Schrittweite [µm]	90	90	90
Spurüberlapp [µm]	90	90	90
Vorschubgeschw.1 [m/s]	0,5	0,5	0,5
Vorschubgeschw.2 [m/s]	1	1,1	1,2
Linie Mittig	nein	nein	Ja

Tabelle 10: Parameter für die Herstellung der V- Nuten

Gitterstruktur:

Um die Gitterstrukturen herstellen zu können wurde die Laserleistung bei 100 % belassen und als erstes die Abtragtiefe in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit untersucht. Die Vorschubgeschwindigkeit musste dafür von 0,1 m/s bis 4 m/s variiert und der entstandene Tiefenabtrag in ein Diagramm aufgetragen werden. Abbildung 31 zeigt die gemessenen Ergebnisse.

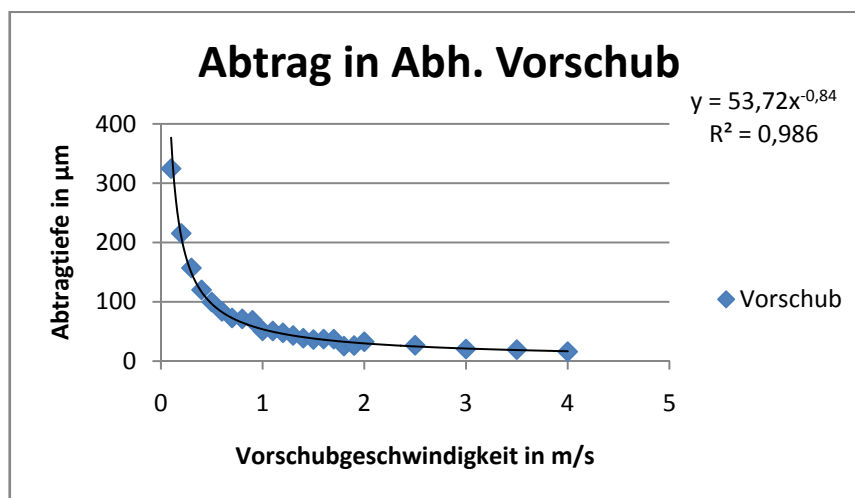


Abbildung 31: Abtragtiefe in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit

Aus diesen Ergebnissen konnten die Vorschubgeschwindigkeiten für die erforderlichen Abtragstiefen berechnet werden. Für die zu untersuchenden Gittertiefen von 30, 80, 130 und 180 μm ergaben sich folgende Werte.

erforderlicher Abtrag [μm]	berechneter Vorschub [m/s]	eingestellter Vorschub [m/s]
30	1,991	2
80	0,625	0,7
130	0,352	0,4
180	0,239	0,25

Tabelle 11: Werte für die Vorschubgeschwindigkeit

Für die Bearbeitung wurden die berechneten Werte aufgerundet. Anschließend konnten Versuche durchgeführt werden um den minimalen Abstand zwischen einzelnen Linien bestimmen zu können. Dafür wurde als erstes die Vorschubgeschwindigkeit auf 2 m/s eingestellt, 5 Linien bearbeitet und der Abstand dieser Linien in 20 μm Schritten von 140 μm bis 360 μm variiert. Einzelne Linien waren ab einen Abstand von 180 μm erkennbar, jedoch zeigten sich kaum Stege zwischen diesen Linien. Ab 240 μm Linienabstand ergaben sich ausreichende Stege um darauffolgend die Zwischenlinien bearbeiten zu können. Dieselben Ergebnisse entstanden bei Versuchen mit den anderen Vorschubgeschwindigkeiten. Anschließend konnten Gitterstrukturen in der Software laserDESK programmiert und der Gitterabstand variiert werden. Für die Erstellung wurde das Programm von Marc Günther (Firma SITEC) verwendet, und unterschiedliche Gitterabstände eingestellt. Das Gitter Delay betrug für alle nachfolgenden Versuche 5 μm . Bei ersten Versuchen mit den voreingestellten Delays zeigte sich keine ausgeprägte Gitterstruktur mit einheitlichem Grund, sondern der Strukturgrund wies einzelne Löcher auf, wie in Abbildung 32 dargestellt.

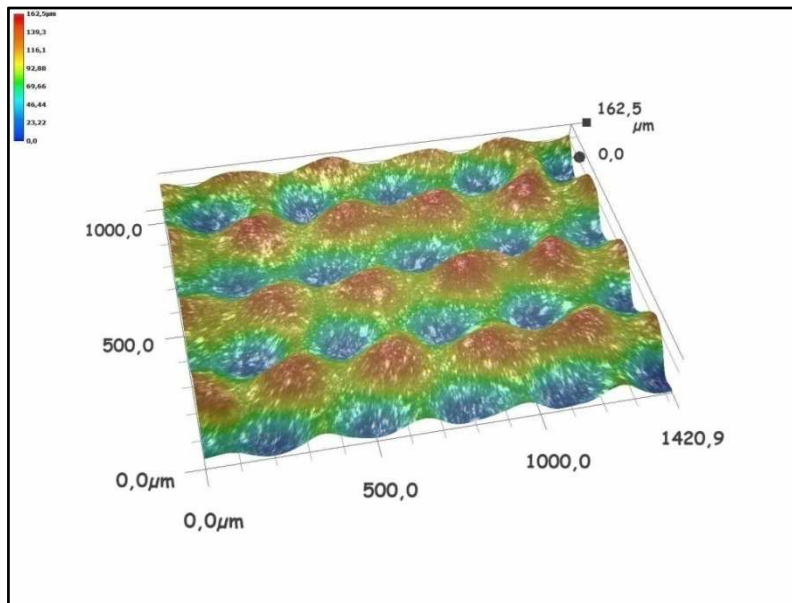


Abbildung 32: Gitterstruktur mit voreingestellten Delays

Aus diesem Grund mussten die Einstellungen für das On-, Off-, Jump- und Mark- Delay verändert werden. Für diese Versuche wurde der Gitterabstand auf $240\text{ }\mu\text{m}$, das Gitter-Delay auf $5\text{ }\mu\text{m}$ und die Vorschubgeschwindigkeit auf 2 m/s eingestellt. Um Aussagen über die Größe der anderen Delays machen zu können wurden als erstes nur die Zwischenlinien bearbeitet. Bei dieser Bearbeitung waren keine einzelnen Linien erkennbar, weshalb jeweils eine Wartezeit nach jeder Linie eingefügt wurde. Um die Spiegelbewegungen auszugleichen musste ebenfalls das Jump- und Mark-Delay vergrößert werden. Bei Wartezeiten von 20 ms nach jeder Linie und einem Jump- und Mark-Delay von jeweils $1000\text{ }\mu\text{s}$ waren die Zwischenlinien einzeln erkennbar.

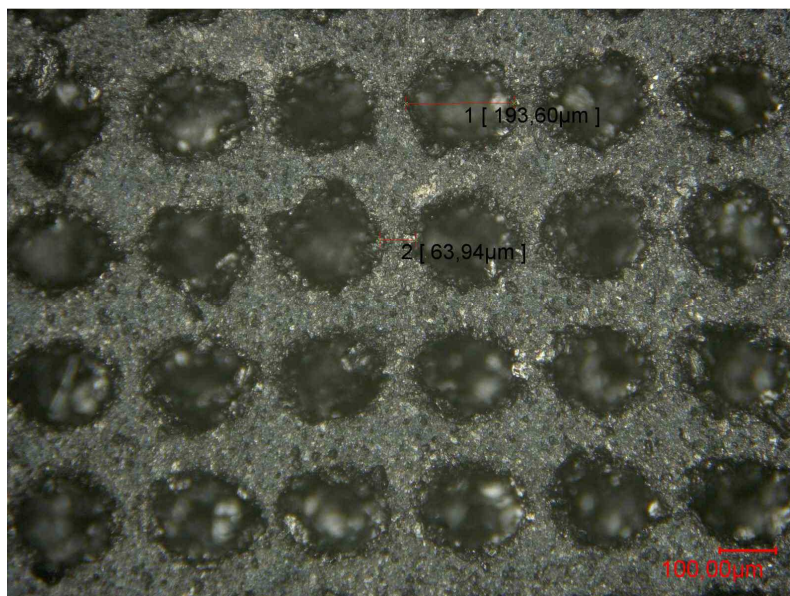


Abbildung 33: einzelne Zwischenlinien

Anschließend konnte die Position der Zwischenlinien über das On- und Off-Delay eingestellt werden. Dafür wurden die Längslinien unterhalb der Zwischenlinien programmiert. Nach der Bearbeitung war zu sehen, ob die Längslinien mittig zwischen den kurzen Linien lagen. Bei dem voreingestellten On-Delay von 250 μs und dem voreingestellten Off-Delay von 350 μs waren die Längslinien etwas nach links versetzt. Dies bedeutet, dass die Bearbeitung der Zwischenlinien etwas eher anfangen, und etwas eher aufhören muss. Aus diesem Grund wurden die Zeiten für das On- und Off-Delay verringert. Bei einem On-Delay von 150 μs und einem Off-Delay von 300 μs wurden die Längslinien mittig in das Material eingebracht wie in Abbildung 34 gezeigt.

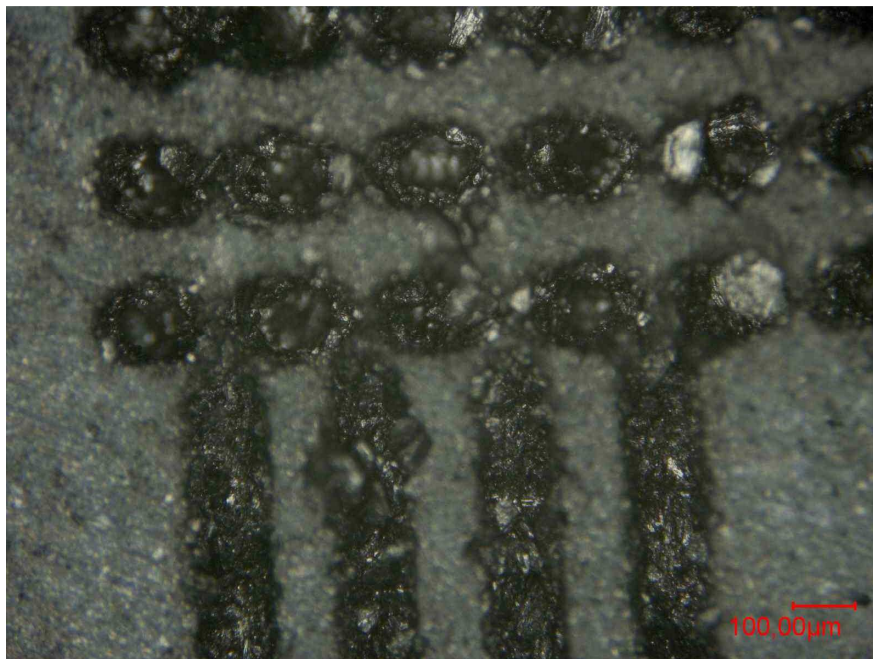


Abbildung 34: Längslinien mittig

Um die Länge der Zwischenlinien einzustellen musste im Anschluss ein vollständiges Gitter bearbeitet werden. Dabei waren keine Auffälligkeiten im Bezug auf die Länge der Zwischenlinien erkennbar. Jedoch war bei diesen Parametern zu erkennen, dass die Abtragstiefe der Zwischenlinien größer war als die der Längslinien. Der Grund dafür liegt an dem zu kurzem On-Delay bzw. dem zu langem Off-Delay. In diesen Phasen ist die Beschleunigung der Spiegel noch nicht abgeschlossen, und der Laser bearbeitet das Material mit einer geringeren Vorschubgeschwindigkeit. Um diesen Effekt zu unterbinden, müsste das On-Delay vergrößert, und das Off-Delay verringert werden. Das bedeutet jedoch eine Verringerung der Länge der Zwischenlinien, weshalb darauf verzichtet wurde. Um diese Abtragstiefe dennoch anzugleichen wurde die Laserleistung für die Bearbeitung der Zwischenlinien reduziert. Bei einer Laserleistung von 55 %, für die kurzen Zwischenlinien, konnten dabei die besten Ergebnisse erzielt werden. Bei 240 μm Gitterabstand zeigten die einzelnen Würfel eher eine runde Form, weshalb der Gitterabstand schrittweise vergrößert wurde. Ein ausgeprägtes Gitter entstand bei einem Gitterabstand von 300 μm . Abbildung 35 zeigt die erzeugten Gitterstrukturen mit 240 μm und 300 μm Gitterabstand.

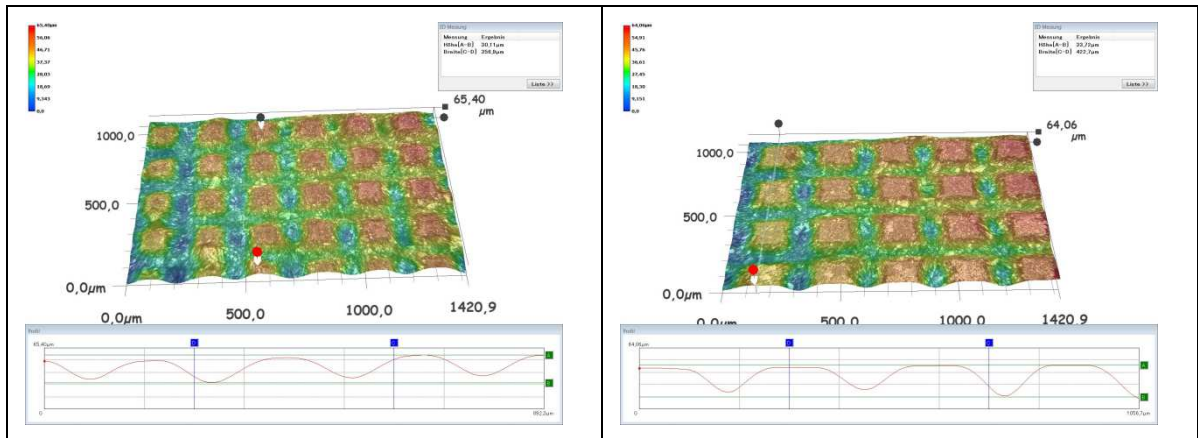


Abbildung 35: Gitterstruktur mit links: 240 μm ; rechts: 300 μm Gitterabstand

Es ist zu erkennen, dass der Strukturgrund nicht mehr über ausgeprägte Löcher verfügt. Die Unebenheiten im Strukturgrund sind auf Inhomogenitäten im Material zurückzuführen. Es ist ebenfalls erkennbar, dass die Probe nicht genau horizontal unter dem Mikroskop lag, weshalb die linke Seite tiefer erscheint.

Für die Erzeugung der tieferen Gitterstrukturen wurde analog vorgegangen. Abbildung 36 zeigt die erzeugten Strukturen und Tabelle 12 die verwendeten Parameter.

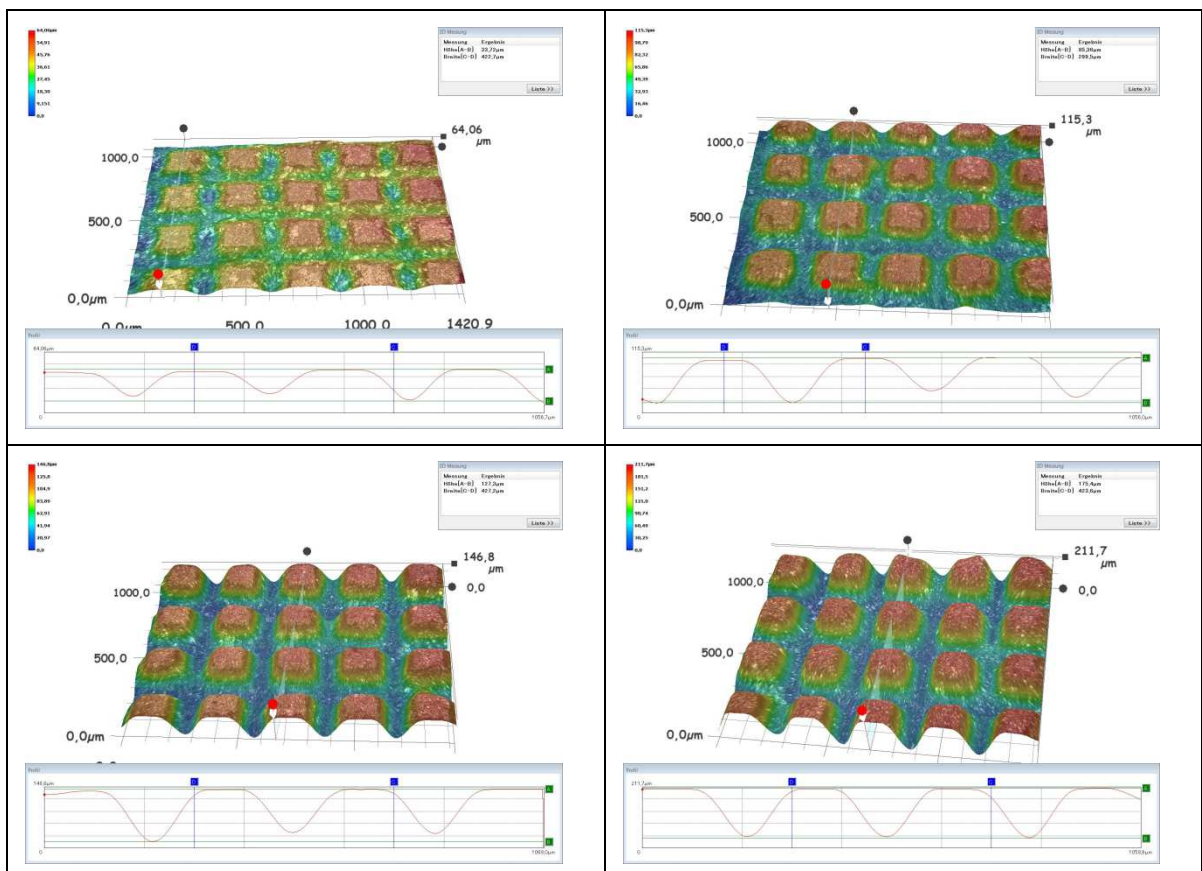


Abbildung 36: Gitterstruktur mit 30, 80, 130, 180 μm Tiefe

Gittertiefe [μm]	30	80	130	180
Betriebsmodus	cw	cw	cw	cw
Gitter- Delay [μm]	5	5	5	5
Vorschubgeschw. [m/s]	2	0,7	0,4	0,25
Laserleistung Längslinien [%]	100	100	100	100
Laserleistung Zwischenlinien [%]	55	100	100	100
On- Delay [μs]	150	300	400	510
Off- Delay [μs]	300	250	150	10
Jump- Delay [μs]	1000	1000	1000	1000
Mark- Delay [μs]	1000	1000	1000	1000
Gitterabstand [μm]	300	300	300	300

Tabelle 12: Parameter zur Bearbeitung der Gitterstruktur

Punktstruktur:

Für die Erzeugung der Punktstruktur wurden anfangs die Grundeinstellungen in der Material-Bearbeitungs-Software beibehalten, und eine erste Struktur hergestellt. Bei diesen Einstellungen waren keine einzelnen Punkte erkennbar, sondern eher einzelne Linien. Aus diesem Grund musste die Einstellung für das Jump- und Mark-Delay erhöht werden. Bei einer Delayeinstellung von 2000 μs für beide Delays zeigten sich einzelne Punkte. Im Anschluss konnte die Zeit für die Punktbeschriftung variiert werden. Ein Tiefenabtrag von ca. 80 μm ergab sich bei einer Punktbeschriftung von 10 μs . Das Ergebnis ist in Abbildung 37 zu sehen.

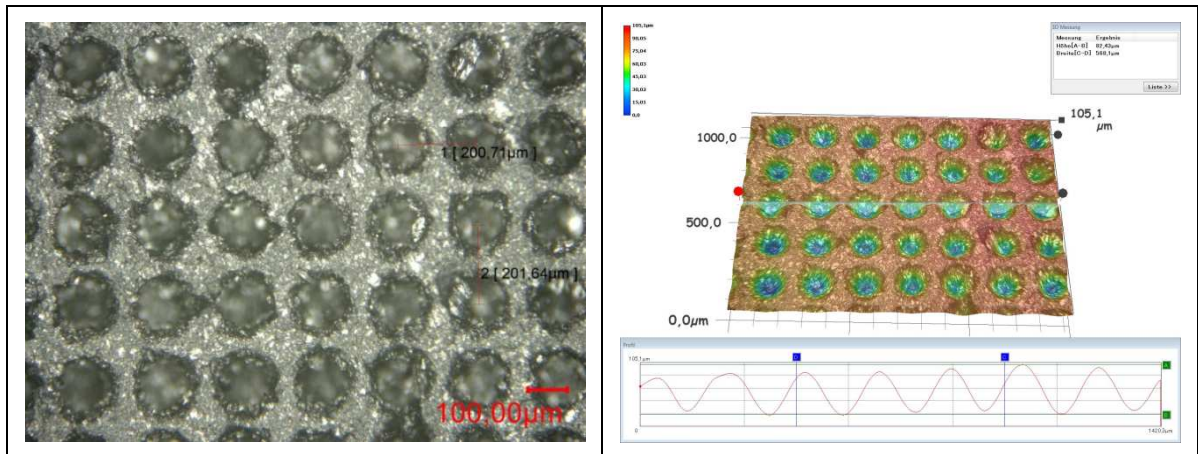


Abbildung 37: Punkstruktur

Die Einstellungen für die Bearbeitung der Punkstruktur sind in Tabelle 13 zusammengefasst.

Laserleistung [%]	100
Betriebsmodus	CW
Vorschubgeschwindigkeit [m/s]	1
Jump- Delay [µs]	2000
Mark- Delay [µs]	2000
Punktbeschriftung [µs]	10

Tabelle 13: Parameter für die Punkstruktur

Markierung:

Für die Rückverfolgbarkeit der Bipolarplatten, werden diese mit einem Data Matrix Code gekennzeichnet. Um sowohl die Strukturen, als auch diesen Code, mit einem Lasersystem herzustellen wurden weitere Versuche durchgeführt. Da kein Lesegerät zur Erfassung des Codes zur Verfügung stand, mussten die Versuche am Mikroskop optisch ausgewertet werden. Anfangs wurden der komplette, quadratische Code, und ein einzelnes Kästchen am Mikroskop aufgenommen und optisch vermessen. Anschließend konnten einzelne Kästchen programmiert und die Laserparameter variiert werden. Abbildung 38 zeigt den Vergleich der einzelnen Kästchen.

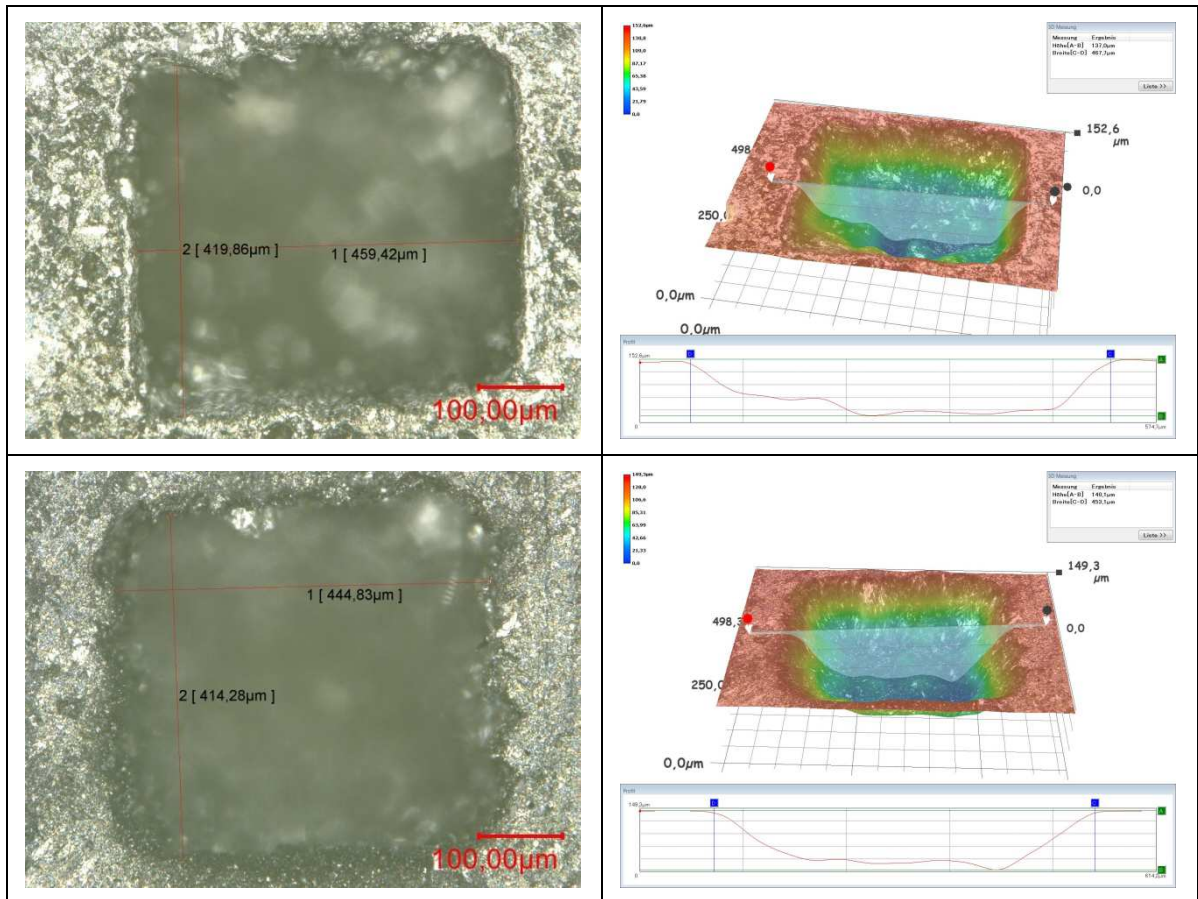


Abbildung 38: Vergleich bisherige Markierung (oben) und neue Markierung (unten)

Es ist zu sehen, dass die einzelnen Kästchen auch mit dem Ytterbium-Faserlaser herstellbar sind. Im Anschluss wurde die komplette Markierung, mit den gewonnenen Parametern, programmiert und die Platte bearbeitet (Abbildung 39).

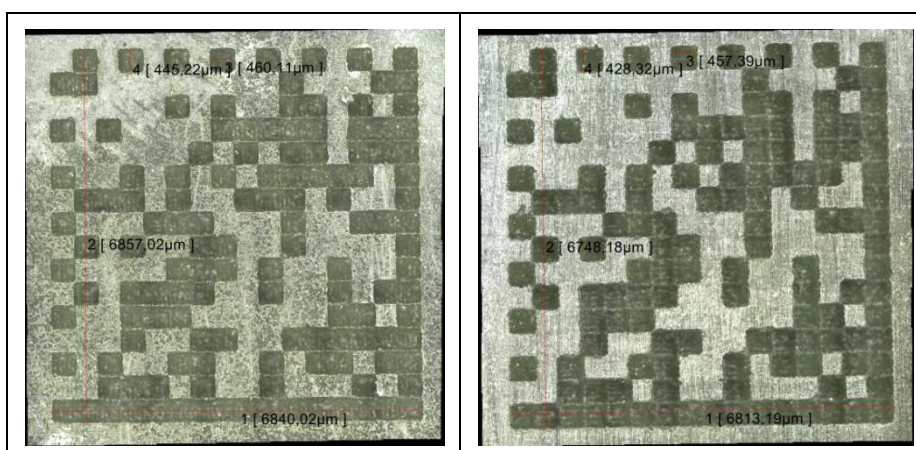


Abbildung 39: Vergleich bisherige Markierung (links) und neue Markierung (rechts)

Der Vergleich der beiden Markierungen zeigt optisch keine großen Unterschiede. Aus diesem Grund, ist davon auszugehen, dass der erzeugte Code auch mit einem Lesegerät

ohne Probleme erfasst werden kann. Die erforderlichen Parameter für die Erzeugung der Markierung sind in Tabelle 14 zu sehen.

Laserleistung [%]	100
Betriebsmodus	cw
Vorschubgeschwindigkeit [m/s]	0,5
On-Delay [μs]	350
Off-Delay [μs]	300
Jump- Delay [μs]	500
Mark- Delay [μs]	500
Fülllinienabstand [μm]	95

Tabelle 14: Parameter zur Herstellung des Data Matrix Codes

5.3.3 Ergebnisse und Zusammenfassung

Die vorgegebenen Strukturen sind mit dem IPG-Faserlaser herstellbar. Für die Gitterstruktur konnte jedoch der vorgegebene Linienabstand von 120 μ m aufgrund des großen Fokusedurchmessers nicht eingehalten werden. Für die Bearbeitung der kompletten Bipolarplatten waren die Strukturen in die Bearbeitungssoftware zu programmieren. Dafür wurden DXF-Dateien vom ZBT-Duisburg in die Software importiert und die zu strukturierenden Bereiche programmiert. Aufgrund des geringen Scannfeldes musste die Platte in zwei Schritten bearbeitet werden. Im Anschluss an die Bearbeitung erfolgte die Reinigung der Platten von Partikeln und Staubrückständen mittels eines handelsüblichen Pinsels. Im folgendem wurden nun komplette Platten mit unterschiedlichen Strukturen bearbeitet und vom ZBT-Duisburg vermessen.

6 Auswertung

Die Vermessung der ersten Bipolarplatten, welche mit dem Explorer XP hergestellt wurden ließ die Vermutung aufkommen, dass sich durch den Laserprozess wiederum eine schlecht leitende Schicht ausprägt. Um diese Vermutung zu untersuchen wurde parallel zu den Strukturierungsversuchen eine Messung des Innenwiderstandes bei unterschiedlichen Abtragstiefen durchgeführt. Dafür wurden mehrere Rechtecke mit variablen Laserleistungen bearbeitet um unterschiedliche Tiefenabträge zu erzeugen. Im Anschluss konnte der Innenwiderstand der Probe vermessen werden, um Aussagen über die Verbesserung des Innenwiderstandes treffen zu können. Die Messung wurde an der Hochschule Mittweida mit der Vierpunktmethod durchgeführt. Dabei werden Vier Messspitzen, mit konstanter Kraft, auf die Oberfläche gebracht, und ein bekannter Strom über die beiden Äußeren Spitzen geleitet. Über die beiden Inneren Messspitzen wird die Spannung gemessen und daraus der Innenwiderstand errechnet. Da diese Methode unabhängig vom Übergangswiderstand zwischen Messspitze und Oberfläche ist bietet sie sich für diese Aufgabe an. Nach der Ermittlung der Widerstände sind diese auf eins normiert und über die Abtragstiefen in einem Diagramm aufgetragen worden.

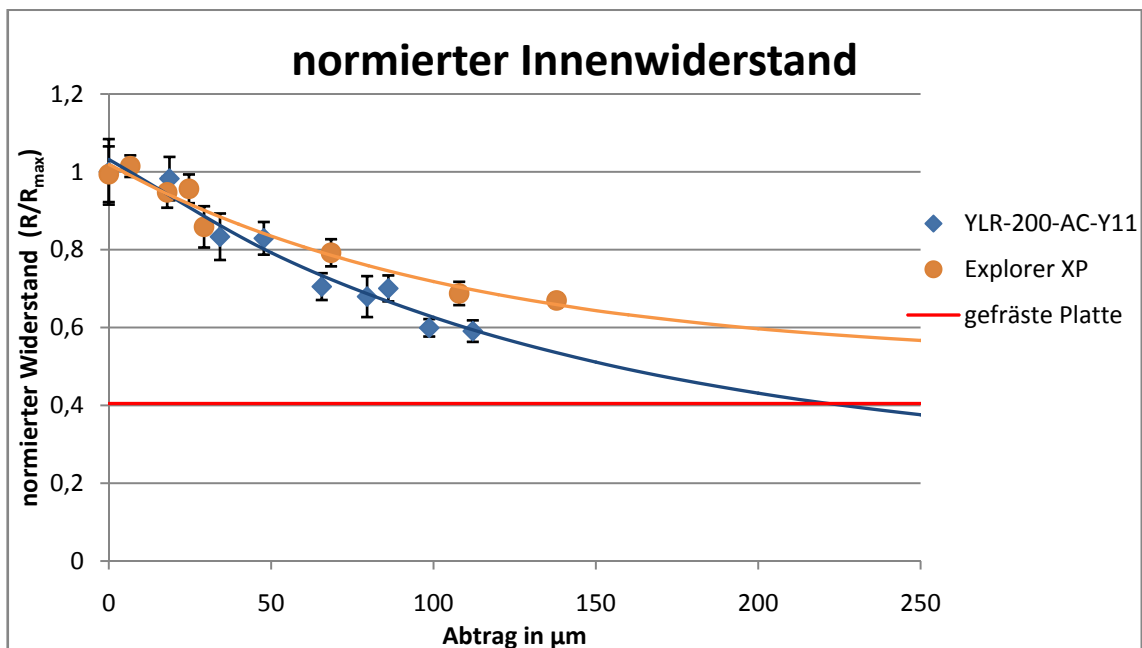


Abbildung 40: normierter Innenwiderstand über Abtragstiefe

Das Diagramm zeigt, dass der Innenwiderstand wie erwartet mit steigendem Abtrag fällt. Um Widerstandswerte wie bei der gefrästen Platte zu erreichen, muss der Tiefenabtrag mindestens 200 μm betragen. Aufgrund der größeren Bearbeitungszeit und des höheren

Wärmeeintrages wurde jedoch der Tiefenabtrag von ca. 100 μm beibehalten, unter der Annahme, dass die Vergrößerung der Oberfläche diesen Effekt wettmacht. Um genauere Aussagen über die Tiefe und Ausbildung der schlecht leitenden Schicht machen zu können, wurden an der Hochschule Mittweida Aufnahmen mit einem Rasterelektronenmikroskop angefertigt. Bei diesen Aufnahmen war jedoch kein Unterschied zwischen einer unbearbeiteten, einer gefrästen und einer laserbearbeiteten Platte zu erkennen. Um den Wärmeeintrag zu verringern wurden Untersuchungen mit einem Femtosekundenlaser (Clark-MXR CPA 2010) an der Hochschule Mittweida vorgenommen. Diese zeigten jedoch ebenfalls keine Verbesserung. Die Widerstandskurve mit diesem Lasersystem lag im Bereich des Explorer XP. Aus Übersichtlichkeitsgründen wurde diese Kurve in Abbildung 40 weggelassen.

Für die Vermessung der Einzelwiderstände sind Platten mit unterschiedlicher Strukturierung hergestellt und an das ZBT-Duisburg verschickt worden. Jeweils ein Plattenpaar ist mit denselben Strukturen bearbeitet worden. Die Aufteilung der Strukturen zeigt folgende Tabelle.

Bezeichnung	Tiefe Gitterstruktur [μm]	Winkel Linienstruktur [$^\circ$]
Ca71_Ca69	0	65
Ca85_Ca84	30	65
Ca77_Ca87	80	60
Ca82_Ca83	80	65
Ca88_Ca89	80	70
Ca80_Ca81	130	65
Ca78_Ca79	180	65

Tabelle 15: Aufteilung der Strukturen für die erste Messung

Neben den unterschiedlichen Gitter- und Linienstrukturen wurden jeweils die Erhebungen der Auswerferstifte entfernt, der Flow Field Bereich flächig abgetragen (ca. 100 μm) und eine Punktstruktur im Dichtungsbereich hergestellt. Die Vermessung ergab eine Verbesserung des Bulkwiderstandes R_Ω , welcher sich aus dem Innenwiderstand der Bipolarplatten und den Kontaktwiderstand zwischen den Platten ergibt (siehe Kapitel 4.3). Der Kontaktwiderstand R_K zwischen Bipolarplatte und GDL zeigte keine Verbesserung im Vergleich zur gefrästen Referenzplatte. Im Vergleich zu einer unbearbeiteten Bipolarplatte sanken jedoch beide Widerstandswerte. Die Vermessung einer unbearbeiteten Platte er-

gab einen Kontaktwiderstand von $41 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ und einen Bulkwiderstand von $239 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$. In Abbildungen 41 und 42 sind die Widerstandswerte über den Strukturen aufgetragen.

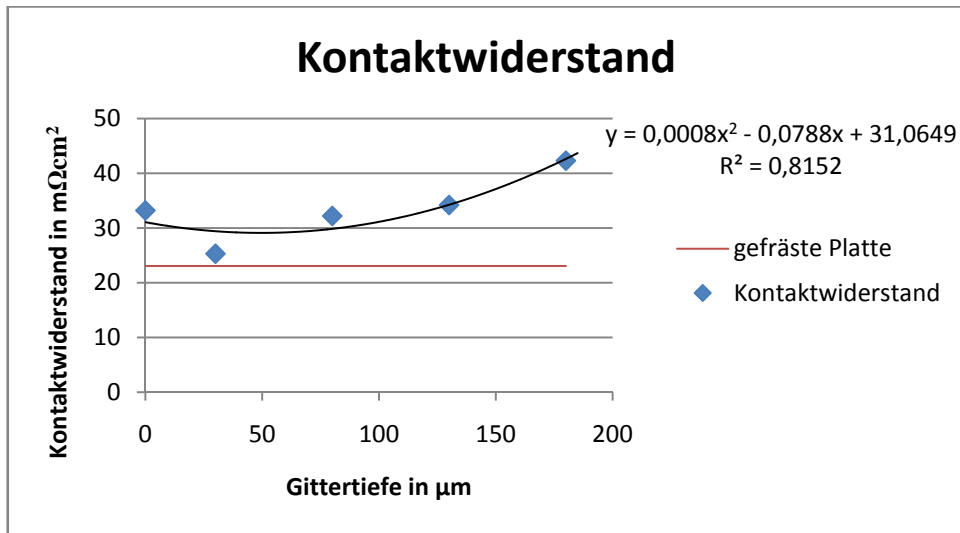


Abbildung 41: Kontaktwiderstand in Abhängigkeit der Gittertiefe

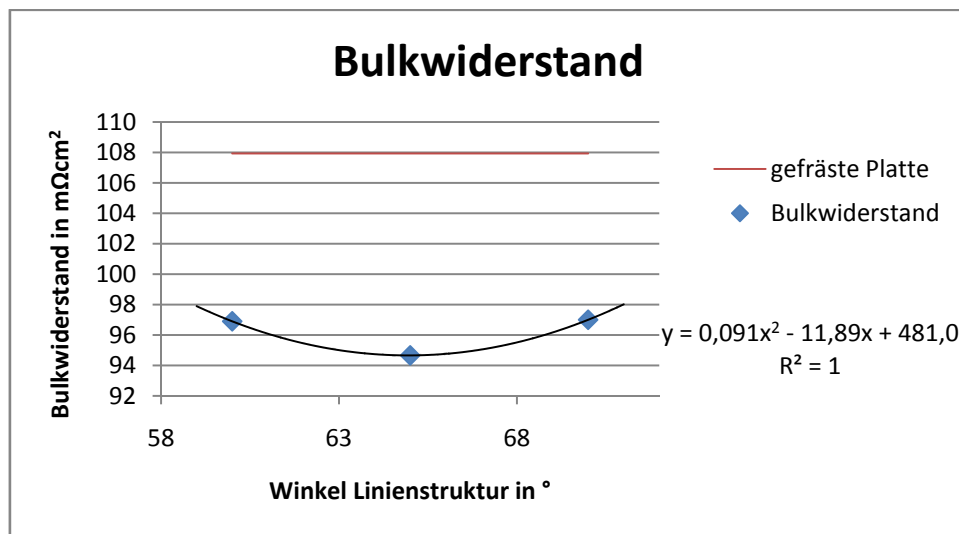


Abbildung 42: Bulkwiderstand in Abhängigkeit des Strukturwinkels

Die Diagramme zeigen, dass ein Minimum der Widerstände vorhanden ist. Das Minimum der Trendlinie des Kontaktwiderstandes liegt bei ca. $50 \mu\text{m}$ und die des Bulkwiderstandes bei einem Winkel von 65° . Für die Strukturen, welche mehrfach auftraten (Gittertiefe $80 \mu\text{m}$ und Winkel 65°) musste der Mittelwert bestimmt und dieser in dem Diagramm dargestellt werden. Aus den einzelnen Werten der Mittelwertbestimmung war zu erkennen, dass das Minimum des Bulkwiderstandes nicht so ausgeprägt war wie in dem Diagramm ersichtlich (einige Werte für einen Winkel von 65° waren größer als der Widerstand bei 60°). Aus diesen Gründen wurden weitere Platten bearbeitet und vermessen. Die genauen Werte aller Messungen sind in Anlage 4 hinterlegt.

Für die zweite Messung wurden drei Plattenpaare mit folgenden Strukturen hergestellt.

Bezeichnung	Tiefe Gitterstruktur [μm]	Winkel Linienstruktur [$^\circ$]
Ca97_Ca99	50	65
Ca93_Ca95	30	60
Ca94_Ca96	30	65

Tabelle 16: Aufteilung der Strukturen für die zweite Messung

Die zweite Vermessung bestätigte die Ergebnisse der ersten. Die Gitterstruktur mit einer Tiefe von 50 μm zeigte keine weitere Verbesserung des Kontaktwiderstandes. Die Werte des Bulkwiderstandes lagen in der Größenordnung der ersten Messung, jedoch näherten sich die Werte für 60° und 65° einander an. Abbildung 43 und 44 zeigen die Diagramme für alle bisherigen Messungen.

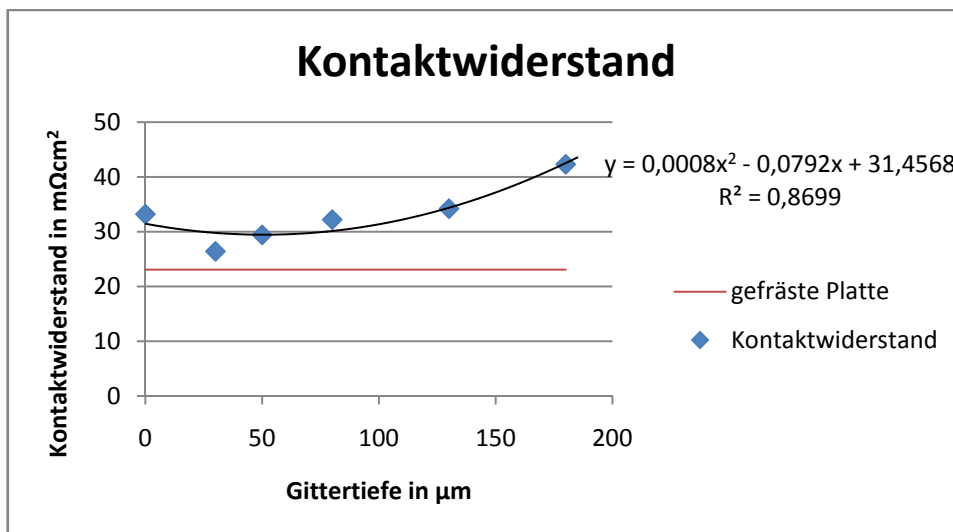


Abbildung 43: Kontaktwiderstand in Abhängigkeit der Gittertiefe

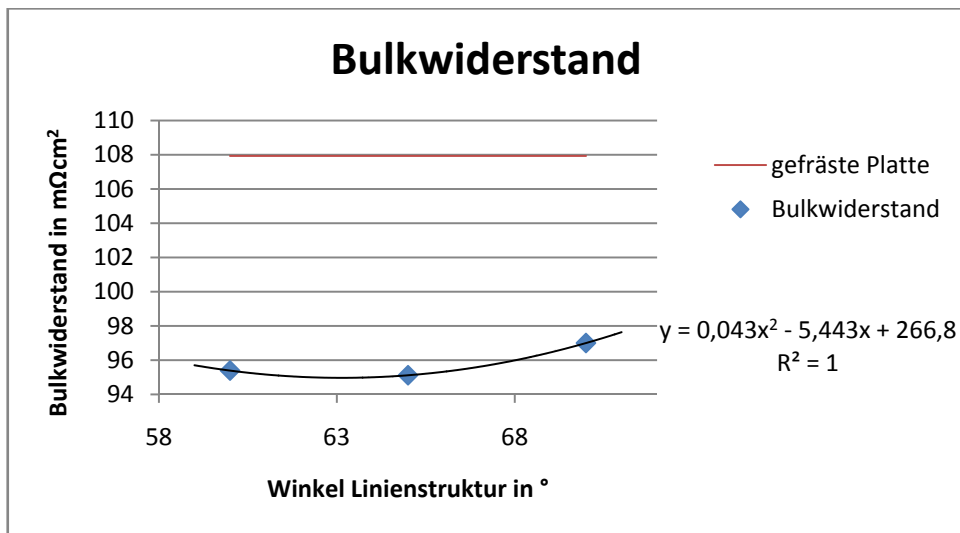


Abbildung 44: Bulkwiderstand in Abhängigkeit des Strukturwinkels

Um eine genaue Aussage über die Funktionalität der erzeugten Strukturen treffen zu können wurden weitere zwei Plattenpaare bearbeitet, bei denen die schlecht leitende Schicht vorher durch einen Fräsvorgang abgetragen wurde. Daher entfiel der Arbeitsgang des Flächenabtrages. Auf diese Platten wurde eine Gitterstruktur mit einer Tiefe von $30\text{ }\mu\text{m}$ und Linienstrukturen mit 60° und 65° aufgebracht. Die Vermessung dieser Platten ergab eine Verbesserung des Kontaktwiderstandes von $23\text{ m}\Omega\text{cm}^2$ auf $22,75\text{ m}\Omega\text{cm}^2$. Der Bulkwiderstand verbesserte sich von $107,93\text{ m}\Omega\text{cm}^2$ auf $88,86\text{ m}\Omega\text{cm}^2$ mit der Linienstruktur mit 65° und auf $84,82\text{ m}\Omega\text{cm}^2$ bei einem Winkel von 60° . Diese Ergebnisse zeigen, dass die Gitterstruktur keine signifikante Verbesserung des Kontaktwiderstandes zwischen Bipolarplatte und GDL erzeugt. Bei der Linienstruktur ist jedoch eine Verbesserung von ca. 20% zu erkennen. Weitere Versuche bei denen die Linienstruktur quer auf die Platte aufgebracht wurde brachten keine weiteren Verbesserungen.

Die durchgeführten Versuche zeigten, dass eine Linienstruktur mit einem Flankenwinkel von 65° die optimalen Ergebnisse brachte. Dadurch konnte der Bulkwiderstand erheblich verringert werden. Die Gitterstruktur mit einer Abtragstiefe von $30\text{ }\mu\text{m}$ erzielte die besten Resultate, jedoch konnte der Kontaktwiderstand, im Vergleich zur gefrästen Platte, nicht reduziert werden.

Für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit ist die Bearbeitungsdauer von entscheidender Bedeutung. Die Zeiten für die unterschiedlichen Bearbeitungen sind in Tabelle 17 zusammengefasst.

Bearbeitung	Bearbeitungszeit [s]
Erhebungen der Auswerferstifte entfernen	14,202
Flächenabtrag Flow Field	131,513
Punktstruktur Dichtungsbereich	66,153
Gitterstruktur 30 µm Tiefe	1400,691
Gitterstruktur 80 µm Tiefe	1435,083
Gitterstruktur 130 µm Tiefe	1475,028
Gitterstruktur 180 µm Tiefe	1530,945
Linienstruktur 60°	408,82
Linienstruktur 65°	393,348
Linienstruktur 70°	1288,235

Tabelle 17: Bearbeitungszeiten

Die Tabelle zeigt, dass die Bearbeitungszeiten für eine komplette Platte bei ca. 30 Minuten liegen. Diese sind für einen wirtschaftlichen Einsatz zu lang, können jedoch durch Verwendung eines geeigneten Scanners, welcher die gesamten 200 Watt toleriert, reduziert werden. Aufgrund der geringen Auswirkung der Gitterstruktur auf den Kontaktwiderstand sollte dieser Bearbeitungsschritt entfallen, wodurch eine weitere starke Verringerung der Bearbeitungszeit auftritt.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Gegenstand der vorliegenden Arbeit war, aufbauend auf vorhergehenden Untersuchungen, funktionale Mikrogeometrien mittels Laserbearbeitung an hochgefüllten Graphit-Polypropylenbauteilen herzustellen. Diese Untersuchungen fanden dabei an Bipolarplatten einer Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle statt. Ziel der Strukturierung war es die elektrischen Eigenschaften der Bipolarplatten zu verbessern und die Haftung silikontypischer Dichtungen auf ihr zu ermöglichen. Durch diese Untersuchungen sollte sowohl der Arbeitsschritt fräsen der Bipolarplatte als auch das aufbringen eines Haftvermittlers substituiert werden. Die Geometrien der herzustellenden Strukturen wurden vom ZBT-Duisburg vorgegeben. Es handelte sich dabei um Gitterstrukturen mit unterschiedlichen Tiefenabtrag, um den Kontaktwiderstand zwischen Bipolarplatte und einer Gasdiffusionslage zu verringern, eine Linienstruktur mit V-förmigem Querschnitt und variablen Winkel für die Verbesserung des Kontaktwiderstandes zweier Platten zueinander und einer Punktstruktur um die Haftungseigenschaften zu verbessern. Zuvor sollte ein Flächenabtrag realisiert werden um eine beim Herstellungsprozess entstehende schlecht leitende Schicht zu entfernen. Beim Herstellungsprozess entstandene Erhebungen mussten ebenfalls flächig abgetragen werden. Zur Rückverfolgbarkeit der einzelnen strukturierten Bipolarplatten wird eine dauerhafte Kennzeichnung auf die Bipolarplatten aufgebracht. Die Strukturen, sowie diese Kennzeichnung, sollten möglichst mit einer Laserquelle hergestellt werden. Die Durchführung der Versuche begann aus diesem Grund mit einem Lasersystem, welches bereits zur Markierung der Platten verwendet wird. Es handelt sich dabei um einen Nd:YAG-Laser der Firma ACI mit der Bezeichnung DPL Fortis Marker und einer Wellenlänge von 1064 nm. Für diesen Laser wurde eine Leistungskurve aufgenommen, die Ablationsschwelle bestimmt und erste Versuche zum Flächenabtrag durchgeführt. Aufgrund einer schlechten Puls-zu-Puls-Stabilität war dieses Lasersystem jedoch für eine definierte Strukturierung nicht einsetzbar. Anschließend musste deshalb eine andere zur Verfügung stehende Laserquelle für die Bearbeitung herangezogen werden. Die folgenden Versuche fanden mit einem Laser der Firma Newport statt. Dabei handelte es sich um einen Nd:YVO₄-Laser mit der Bezeichnung Explorer XP und einer emittierten Wellenlänge von 532 nm. Die Versuche mit diesem Lasersystem zeigten, dass sowohl ein Flächenabtrag als auch die Erzeugung einer Linienstruktur mit V-förmigen Querschnitt bearbeitet werden konnte. Erste Vermessungen der Widerstandswerte ergaben jedoch keine Verbesserungen. Wegen der geringen Leistung (5 Watt) und des kleinen Spotdurchmessers (ca. 25 µm) war die Bearbeitungszeit der Platten extrem hoch. Auf Grund dieser langen Bearbeitungszeiten wurden die Versuche mit dem Explorer XP aus wirtschaftlichen Gründen abgebrochen und es musste auf eine weitere Laserquelle zurückgegriffen werden. In der Firma SITEC stand noch ein weiteres Lasersystem zur Verfügung. Dabei handelte es sich um einen Faserlaser der Firma IPG mit der Bezeichnung YLR-200-AC-Y11. Da dieser Laser über eine maximale Ausgangsleistung von 200 W und einem Spotdurch-

messer von 128,3 μm verfügte konnte die Bearbeitungszeit sehr deutlich reduziert werden. Dieser Laser wurde im cw-Modus betrieben. Um eine eventuelle Beschädigung des Scannersystems zu vermeiden, wurde die Maximalleistung des Lasers auf 100 W reduziert. Bei diesen Versuchen konnten die geforderten Strukturen hergestellt und die bearbeiteten Platten gereinigt und vermessen werden. Die Laserbearbeitung fand dabei über die ganze Fläche statt, d.h. nicht nur auf den Stegen der in Abbildung 5 gezeigten Kanäle. Für die Vermessung der Kontaktwiderstände spielt es keine Rolle, ob die Grundflächen der Kanäle ebenfalls strukturiert wurden.

Die Vermessungen der strukturierten Bipolarplatten am ZBT-Duisburg ergaben eine Verbesserung des Kontaktwiderstandes zwischen zwei Platten. Die besten Resultate wurden dabei durch eine Linienstruktur mit einem Flankenwinkel von 65° erreicht, welcher den Bulkwiderstand verringerte. Der Kontaktwiderstand zwischen der Bipolarplatte und der GDL zeigte jedoch keine Verbesserung. Die besten Widerstandswerte wurden mit einer Gittertiefe von 30 μm erzielt, lagen aber über denen einer gefrästen Platte.

Die Entfernung der Erhebungen der Auswerferstifte wurde größflächiger realisiert, da eine genaue Ausrichtung der Platten durch einen Anschlag sehr schwierig war. Dadurch entstand jedoch ein Graben um diese Erhebungen, welcher sich als nachteilig für die Aufbringung der Silikondichtung erwies. Die Erhebungen sollten durch Veränderungen am Spritzgusswerkzeug beseitigt werden.

Ein Flächenabtrag ist möglich und zeigt auch eine Reduzierung des Innenwiderstandes der Platten. Aufgrund der, im Vergleich zum Fräsvorgang, hohen Bearbeitungszeit und der Probleme mit der Silikondichtung ist es jedoch aus wirtschaftlichen Gründen besser an dem Fräsvorgang festzuhalten. Die Bearbeitungszeiten können jedoch noch reduziert werden, durch Verwendung eines Scanners, welcher bei der maximalen Laserleistung nicht beschädigt wird.

In den nächsten Schritten ist es notwendig die erzeugten Strukturen nur auf der Plattenoberfläche herzustellen, um Verschlechterung im Strömungsverhalten der eingesetzten Gase ausschließen zu können. Durch diesen Schritt lässt sich die Bearbeitungszeit weiter reduzieren. Anschließend sollte sich für eine geeignete Bearbeitung entschieden werden (Fräsen + Strukturieren oder Flächenabtrag + Strukturieren) und genügend Platten für einen Brennstoffzellen- Stack bearbeitet werden um genauere Aussagen über eine Veränderung des Wirkungsgrades treffen zu können.

8 Literatur

- [DIE13] <http://www.diebrennstoffzelle.de/zelltypen/geschichte/index.shtml>,
verfügbar am 11.02.2013 um 14.40 Uhr
- [GEI04] Geitmann, Sven: Wasserstoff und Brennstoffzellen – Die Technik
von Morgen,
Oberkrämer, Hydrogeit, 2004
- [BRA12] Brauer, Erik: Untersuchung zur Herstellung gezielter Mikrogeomet-
rien mittels Laser an hochgefüllten Graphitpolypropylenbauteilen
Mittweida, Bachelorarbeit, 2012
- [KEL09] Keller, Vivien: Gasdiffusionselektroden für PEM- Brennstoffzellen
durch In Situ- Elektrodeposition,
Saarbrücken, Dissertation, 2009
- [SCH05] Schmidt, Walter: Die Alkalische Brennstoffzelle,
Darmstadt, Publikation, 2005
- [KRE08] Kreuz, Can: PEM- Brennstoffzellen mit spritzgegossenen Bipolar-
platten aus hochgefüllten Graphit- Compound,
Duisburg, Dissertation, 2008
- [WAS13] http://www.wasserstoff-cd.de/html/b_wirkungsgrad.html,
verfügbar am 13.02.2013 um 15.50 Uhr
- [HEI09] Heina, Matthias: Siebdruckdichtungen für Brennstoffzellen am
Beispiel von Bipolarplatten,
Duisburg, Zentrum für Brennstoffzellentechnik GmbH, 2009
- [GRI11] Grimm, Tobias / Kippelt, Volker: Entwicklung einer Methode zur
Qualitätssicherung bei der Fertigung von Bipolarplatten für Brenn-
stoffzellen,
Duisburg und Berlin, Abschlussbericht, 2011
- [YNA13] http://www1.ynao.ac.cn/~jinhuahe/know_base/dust/dust_general.h

[tm](#)

verfügbar am 27.03.2013 um 13.00 Uhr

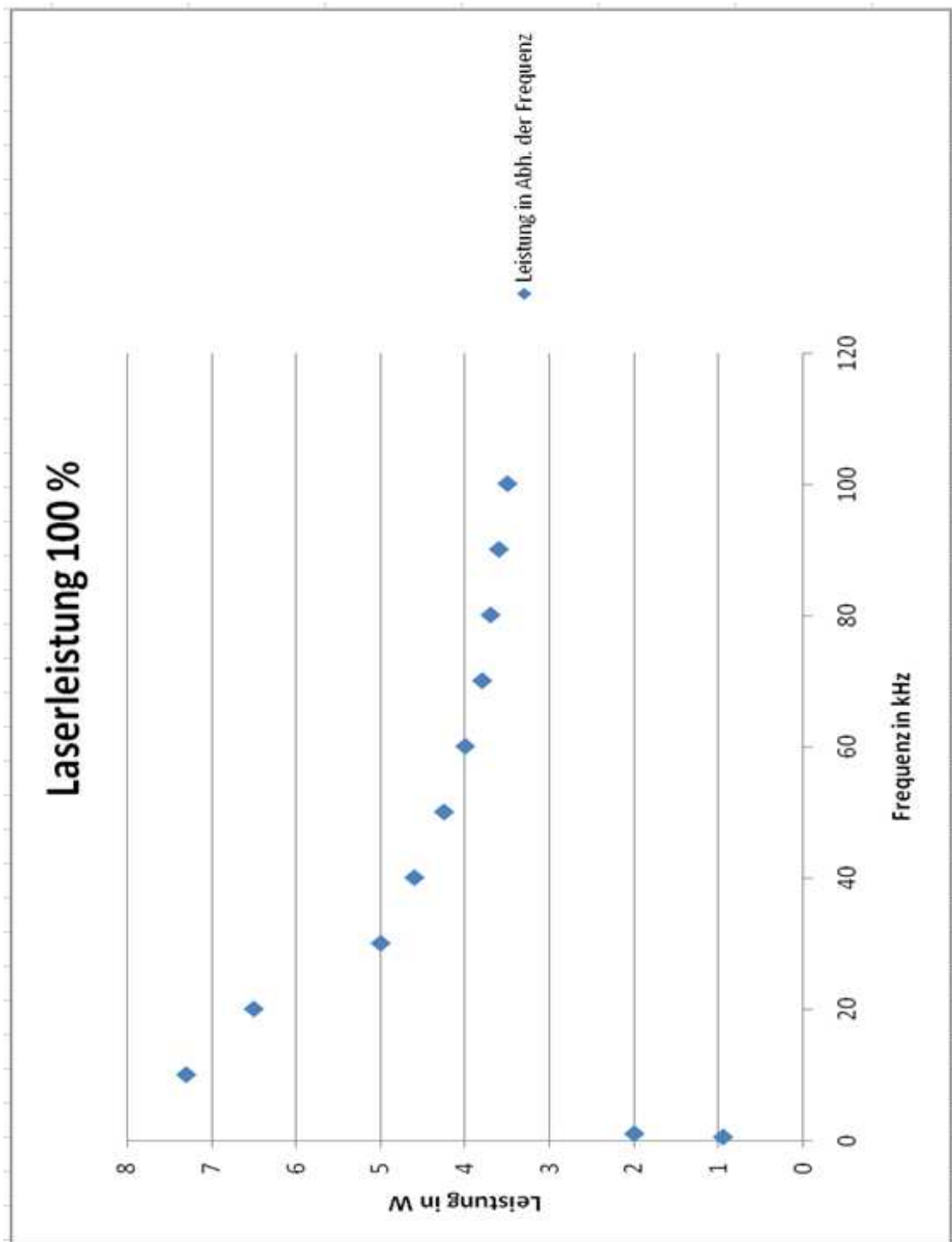
- [KLO07] Klocke, Fritz / König, Wilfried: Fertigungsverfahren: Band 3: Abtragen, Generieren und Lasermaterialbearbeitung, Berlin, Springer, 2007
- [LOR09] Lorenz, Andreas: Analyse des Laserstrahlabtrags für den wirtschaftlichen Einsatz im Werkzeug- und Formenbau, Göttingen, Cuvillier, 2009
- [KOR07] Kordt, Johannes: Konturnahes Laserstrahlstrukturieren für Kunststoffspritzgießwerkzeuge, Aachen, Dissertation, 2007
- [EIC10] Eichler, Jürgen / Eichler, Hans Joachim: Laser- Bauformen, Strahlung, Anwendung, Heidelberg, Springer, 2010
- [HÜG09] Hügel, Helmut / Graf, Thomas: Laser in der Fertigung, Wiesbaden, Vieweg und Teubner, 2009
- [ZIM11] Zimmermann, Till / Preißner, Lars: Varietherme Prozessgestaltung mittels Induktionstemperierung zur spritzgusstechnischen Verarbeitung hochgefüllter Thermoplaste in Brennstoffzellenanwendungen, Duisburg und Stuttgart, Abschlussbericht, 2011
- [NIE05] Niemzig, Oliver: Entwicklung eines portablen PEM- Brennstoffzellensystems mit Bipolarplatten aus einem elektronisch leitfähigen thermoplastischen Compound- Material, Duisburg und Essen, Dissertation, 2005
- [ÖZT12] Öztürk, Gökhan: Hochgefüllte Graphit- Polymer- Compounds für Einsätze im Wärmemanagement, Darmstadt, Dissertation, 2012
- [BAY13] <http://daten.didaktikchemie.uni-bayreuth.de/umat/modifikationen-c2/c-modifikationen.htm>
verfügbar am 26.02.2013 um 10.00 Uhr

- [KAI08] Kaiser, Ralf: Bipolarplatten für Polymerelektrolytmembran- Brennstoffzellen aus thermisch und elektrisch hochleitfähigen thermoplastischen Kunststoffen, Berlin, Logos Verlag, 2008
- [HEI13] Heina, Matthias: Zwischenbericht zum ZIM- Kooperationsprojekt: Herstellung funktionsgerechter Oberflächenstrukturen an hochgefüllten Kunststoffbauteilen mittels Laser am Beispiel von Bipolarplatten, Duisburg, 2013
- [BON01] Bonse, Jörn Olaf: Materialbearbeitung von Halbleitern und Nitridkeramiken mit ultrakurzen Laserpulsen, Berlin, Dissertation, 2001
- [SCH07] Schille, J. / Ebert, R. / Regenfuß, P. / Exner, H.: Einfluss der Pulslänge bei der abtragenden Laserbearbeitung von Metallen, Mittweida, 2007
- [FLE05] Fleischmann, Claudia: Erzeugung und Beeinflussung der Topographie periodischer Mikrostrukturen unter Nutzung der Laserinterferenztechnik mittels Femtosekundenpulsen, Zwickau, Diplomarbeit, 2005
- [REI13] Reinke, Norman: Technologie- und Anlagenkonzeption zum Laserstrukturieren von Bipolarhalbplatten, Duisburg- Essen, Diplomarbeit, 2013

9 Anlagen

Leistung in Abhängigkeit der Frequenz	A-I
Prüfprotokoll Explorer XP.....	A-II
Leistungskurve IPG- Faserlaser.....	A-III
Werte Widerstandsmessung.....	A-IV

Leistung in Abhängigkeit der Frequenz



Prüfprotokoll Explorer XP

Explorer™ Test Report:



A Division of Newport Corporation
Newport Spectra-Physics GmbH, Stahnsdorf Site (Germany)

Laser Head	
Model Number	ICD-532-5W-E
Serial Number	SV-0039-61
Software Version	V1.0.1.54
Wavelength [nm]	532
Main PRF [kHz]	80
Main Power [mW]	5000

Laser Controller	
Model Number	Internal
Serial Number	SV-0039-61
Software Version	V1.0.1.112

Test Date	30/ Mar/ 2012
Operator Initials	JU
Customer ID	

Remarks:

Laser Performances

	PRF [kHz]	Pulse Energy internal [μJ]	Power external [mW]	Pulsewidth τ _{FWHM} [ns]	Diode Current [A]	Pulse Energy Noise ⁽¹⁾ 1 σ	6σ / 6	Beam Quality		Waist Diameter [μm]		Divergence (full angle) [mrad]		Waist Location [mm]		Astig.	Ellipticity
								M ² X	M ² Y	X	Y	X	Y	X	Y		
Spec. ⁽²⁾	80.0	62.5	5000	< 8.0	info	< 3.0%	info	< 1.20	< 1.20	171 ... 209	171 ... 209	3.0 ... 4.5	3.0 ... 4.5	-74.5 ... -54.5	-74.5 ... -54.5	< 0.20	< 1.10
x	80.0	62.5	5015	7.2	5.60	1.7%	1.7%	1.05	1.04	194	203	3.7	3.5	-70	-66	0.07	1.04
info	80.0	79.9	4928	5.7	5.60	2.4%	2.3%	1.04	1.04	190	201	3.7	3.5	-71	-65	0.09	1.06
info	100.0	51.1	5102	9.1	5.60	1.7%	1.8%	1.05	1.04	197	205	3.6	3.4	-70	-65	0.09	1.04
info	200.0	24.8	4964	17.4	5.60	1.0%	1.1%	1.05	1.04	199	209	3.6	3.4	-69	-65	0.07	1.05
info	300.0	15.1	4599	23.8	5.60	1.2%	1.3%	1.04	1.02	197	206	3.6	3.4	-69	-64	0.07	1.05

Power Set Point at 80 kHz:	Global Parameters	
	Factory	Customer
Diode set temperature [°C]	[opt for 62.5 μJ] 29.6	[opt for 62.5 μJ] 29.6
SHG set temperature [°C]	2733	2733

Global Parameters (Not part of the User Parameters):	
Maximum diode current [A]	6.19
Maximum laser head temperature [degC]	40
Pulse Energy reference voltage [cts]	601
Av. Power calibration factor [W/V]	11.67

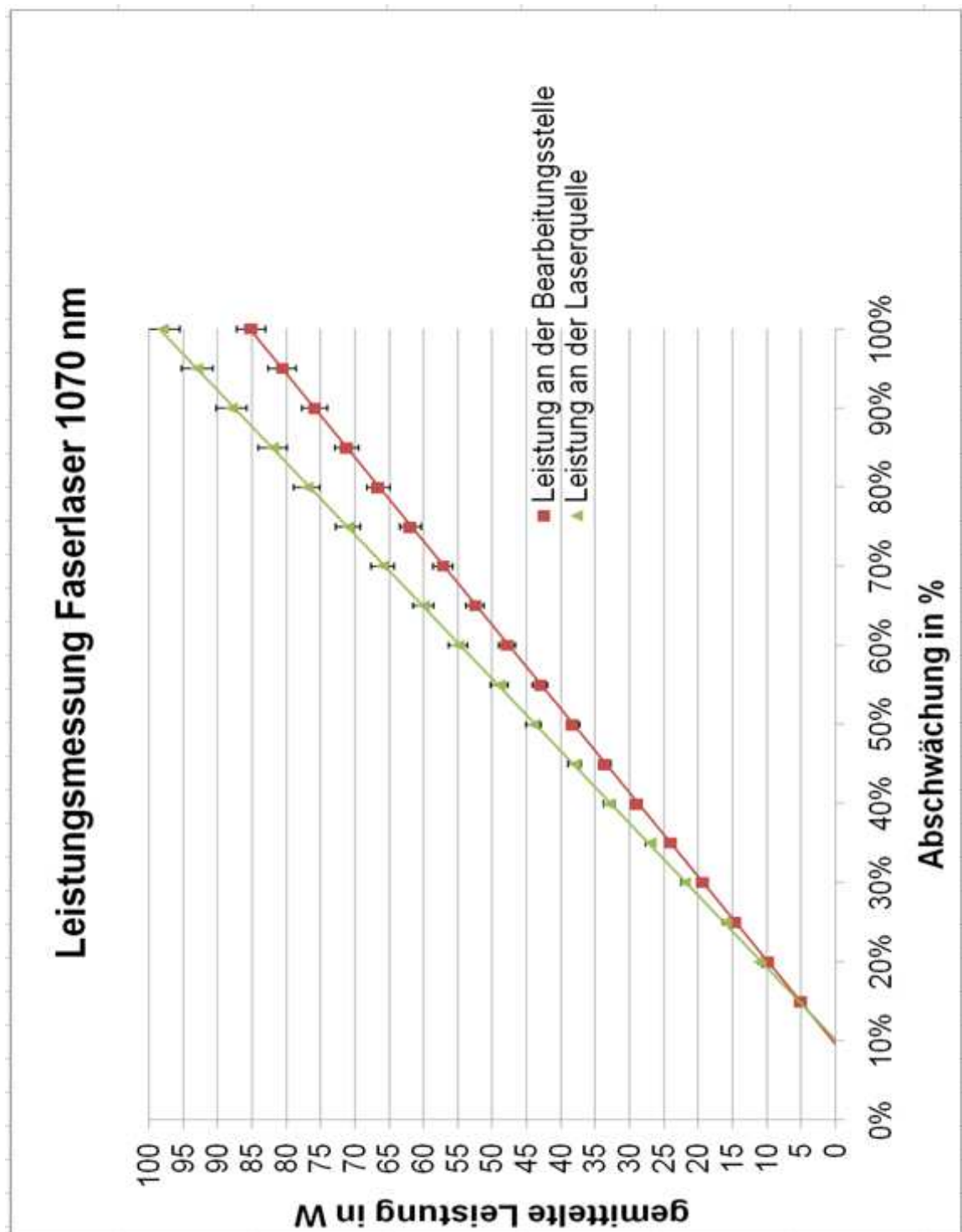
(1) Pulse energy noise measured with a low pass filter 3dB @ 650MHz. Specified noise values are 1 σ values (RMS).
(6σ / 6) is calculated from ((max - min)/avg)/6 for a significant number (> 1000) of pulses. For an ideal Gaussian distribution this is equal to 1σ.

(2) Bold font values are specified values, normal font values are for information only (achieved with factory 1 setting).

Note: These measurements were made in the Newport Spectra-Physics GmbH facility in Stahnsdorf (Germany). Specific measurements are affected by temperature and other parameters. Attempts to duplicate any or all of these measurements should take these factors into consideration.

Template Rev. 039_ICD-532-5W-E1, C.1
Page 1

Leistungskurve IPG- Faserlaser



Werte Widerstandsmessung

Bezeichnung	Gittertiefe in μm	Kontaktwiderstand in $\text{m}\Omega\text{cm}^2$	Winkel Linienstruktur in $^\circ$	Bulkwiderstand in $\text{m}\Omega\text{cm}^2$
CA71_CA69	0	33,2	65	83
Ca85_Ca84	30	25,3	65	99,3
Ca94_Ca96	30	26,85	65	101,15
Ca93_Ca95	30	27,06	60	93,88
Ca97_Ca99	50	29,41	65	91,37
Ca82_Ca83	80	30,4	65	94,5
Ca88_Ca89	80	32,7	70	97
Ca77_Ca87	80	33,5	60	96,9
Ca80_Ca81	130	34,2	65	99,3
Ca78_Ca79	180	42,3	65	97,2
gefräst	30	22,93	60	84,82
gefräst	30	22,56	65	88,86
Linien quer	50	29	60	110
Linien quer	50	35	65	87
Referenz 1		22		109
Referenz 2		26,8		104,2
Referenz 3		20,4		110,6
Referenz 4		22		109
Referenz 5		24		108
ohne Bearbeitung		41		239

10 Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, den 06.12.2013

Sven Neumann